

Künstliche Agenten. Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten

Wolfgang Weller, 2011

1. Einführung

Der Begriff „Agent“ ist uns aus dem täglichen Leben wohlbekannt. Auf Agenten können gewisse Aufgaben delegiert werden, von denen wir uns entlasten möchten oder wo wir eine spezielle Sachkompetenz in Anspruch nehmen möchten. So übertragen wir Aufgaben mit Rechtscharakter an Rechtsanwälte, den Verkauf oder Kauf von Immobilien an Makler, die Buchung von Reisen an Reisebüros u. v. a. m. Am bekanntesten ist vielleicht die Beauftragungen von Detektiven oder Geheimdiensten zur Erstellung von Dossiers.

Inzwischen wurde erkannt, dass das Agentenkonzept ein über die geläufige Nutzung durch Menschen weit hinaus reichendes Potenzial besitzt. Hierbei handelt es sich um künstliche Agenten, welche wesentliche Beiträge zur Entwicklung innovativer Lösungen leisten können. Diese Tendenz wollen wir fördern, indem im vorliegenden Beitrag das Wesen und die wichtigsten Grundlagen des Agentenkonzepts dargelegt und Anregung für entsprechende Einsatzmöglichkeiten gegeben werden.

2. Grundlagen des Agentenkonzepts

2.1. Wesen

Zunächst ist zu verdeutlichen, was unter dem Begriff *Agent* zu verstehen ist und welche Eigenschaften ein solcher besitzt. Dazu wird hier eine etwas allgemein gehaltene Definition vorangestellt, die gegenüber [1] modifiziert wurde:

Ein Agent ist ein Wesen (eine Person oder ein künstliches Gebilde), das ermächtigt werden kann und in der Lage ist, im Auftrag Dritter weitgehend selbständig zielgerichtet zu handeln.

Daraus lassen sich bestimmte Schlüsselattribute entnehmen, die wie folgt kommentiert werden:

- *Delegation*

Nach Art einer Geschäftsvermittlung erbringt der Agent im Auftrag seines Nutzers – der ggf. auch ein anderer Agent sein kann – bestimmte Leistungen. Damit besteht eine Auftraggeber-Auftragnehmer-Relation.

- *Aktivität*

Der Agent entfaltet eigene Aktivitäten bei der Auseinandersetzung mit seiner Umwelt zur Erledigung der übertragenen Aufträge oder von Dingen und handelt dabei planvoll.

- *Autonomie*

Der Agent erledigt die ihm übertragenen Aufträge weitgehend selbständig ohne direkte Intervention mit seinem Benutzer.

Um diese Merkmale rechtfertigen zu können, muss ein Agent über folgende Fähigkeiten verfügen [1], [2], [3]:

- *Interaktivität*

Damit ein Agent für einen Nutzer Leistungen erbringen kann, muss er in seiner Umwelt mit verschiedenen Komponenten bzw. Teilsystemen zusammenwirken. Dieses Zusammenwirken

geschieht wechselseitig und wird daher Wechselwirkung bzw. Interaktion genannt. Die Interaktionen beziehen sich sowohl auf die Umgebung des Agenten als auch auf externe Quellen. Zur Umgebung eines Agenten können ggf. auch andere Agenten gehören. Bei den Interaktionen werden Informationen und/oder auch Material und Energie ausgetauscht und ggf. sogar verändert. Dementsprechend unterschiedlich sind die Erscheinungsformen der Interaktion. Typische Fälle sind die informationelle, die physikalische und die Prozessinteraktion.

- *Kommunikation*

Die Erledigung von Aufgaben durch Agenten ist daran gebunden, dass diese über die Fähigkeit verfügen, miteinander Informationen auszutauschen, d. h. zu kommunizieren. Über die Kommunikation vollzieht sich die informationelle Interaktion. Der Bedarf an einem Informationsaustausch kann permanent oder nur zeitweise – etwa beim Eintritt bestimmter Situationen – bestehen. Zweck der Kommunikation ist die Übermittlung von Zuständen, Befehlen, Nachrichten (Botschaften) oder sogar Prozeduren. Auf dem Weg der Kommunikation werden aber auch Steuersignale übermittelt, die etwa benötigt werden, um Teilprozesse zu synchronisieren bzw. zu koordinieren.

- *Intelligenz*

Die selbständige Ausführung der Aufgaben durch Agenten ohne wesentliche Interaktionen mit ihrem Nutzer verlangt einen gewissen Grad an Intelligenz. Hierbei handelt es sich um bestimmte Fähigkeiten kognitiver Art, wie Beobachten, Erkennen, Entscheiden u. a. Derartige Leistungen werden zur Analyse von Situationen, Auswahl und Entwicklung von Strategien, operativen Planung u. a. benötigt. Verhaltensweisen mit den Merkmalen von Intelligenz manifestieren sich in Form entsprechender Programme und bedürfen zu ihrem Wirksamwerden einer Implementierung mittels Computern. Dementsprechend wird für solche Art von Intelligenzen auch Bezeichnung wie *maschinelle Intelligenz* oder *künstliche Intelligenz* verwendet.

Den genannten kann noch folgendes unabhängig geltende Merkmal zugefügt werden:

- *Mobilität*

Hierbei handelt es sich um die Fähigkeit eines Agenten sich selbst zu transportieren bzw. von einer unabhängigen Instanz transportiert zu werden. Dieser Ortswechsel – auch Migration genannt – kann je nach Verkörperung des Agenten in einer real vorhandenen physikalischen Welt oder auch innerhalb eines elektronischen Netzwerkes stattfinden. Mobile Agenten sind stets Träger von Informationen bedarfsweise aber auch zusätzlich von Materie oder Energie. Nicht mobile Agenten sind ortsgebunden und daher stationär. Tritt der Mobilitätsbegriff nicht in der Agentenbezeichnung auf, so handelt es sich um stationäre Agenten.

Die derzeit realisierten Agenten bzw. Agentensysteme enthalten nicht notwendigerweise sämtliche der aufgeführten Merkmale. Denn Agenten, die unseren Erwartungen vollständig entsprechen, hätten einen solch hohen Ressourcenbedarf, der kaum zu befriedigen wäre.

Je nach dem, welcher der genannten Aspekte in den Vordergrund gerückt wird, ergeben sich verschiedene Sichtweisen zur Charakterisierung von Agenten. Dies drückt sich in recht unterschiedlichen Agentendefinitionen aus, wie die folgenden Beispiele zeigen:

- *Standpunkt der Systemwissenschaft*
Autonom agierende Einheiten in komplexen Systemen
- *Standpunkt der Robotik*
Roboter, die Handhabungs- und/oder Arbeitsaufgaben autonom lösen [4]

- *Standpunkt der Informatik*
Intelligente Programme, die in einer vernetzten Welt ein effektives und kooperatives Arbeiten mit Computern ermöglichen [3]
- *Standpunkt der Künstlichen Intelligenz KI (Artificial Intelligence AI)*
Verteilte künstliche Intelligenzen, die sich aus ihrem Wissen heraus definieren.
- *Standpunkt des Künstlichen Lebens KL (Artificial Life AL)*
Künstliche Lebewesen, die in einer künstlichen Welt Eigenschaften von Lebewesen zeigen.

2.2. Dienstleistungsbeziehungen

Agenten werden benutzt, um für ihre Benutzer irgendeine Art von Dienstleistungen zu erbringen. Die Art dieser Dienste kann sehr unterschiedlich sein. Die Benutzer treten hier als Dienstgeber (*DG*) auf, welche gewisse Aufgaben in Auftrag geben. Die Agenten sind folglich Dienstnehmer (*DN*), welche die erhaltenen Aufträge autonom und unter Wechselwirkung mit der Umgebung ausführen. Bei den Dienstnehmern kann es sich dabei um Personen, technische Gebilde oder auch andere Agenten handeln.

Zwischen den Auftraggebern und –nehmern besteht eine Dienstleistungsrelation. Ihre Grundform ist durch die aufeinander folgende Beauftragung und Ergebnismeldung, also eine wechselseitige Beziehung, gekennzeichnet (**Bild 2-1**).

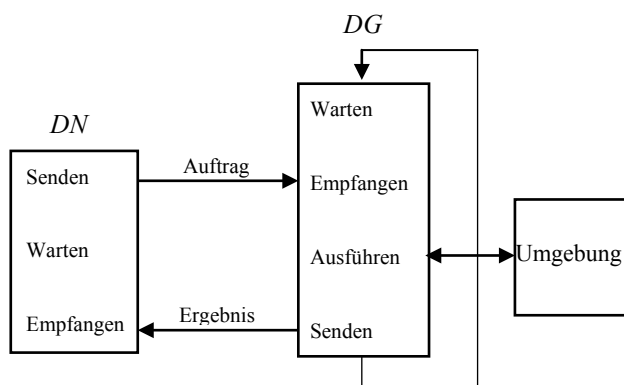


Bild 2-1 Beauftragung mit Ergebnismeldung

Der jeweilige Auftrag enthält eine Beschreibung der gestellten Aufgabe sowie ggf. auch Angaben über die Umstände und die Art und Weise seiner Ausführung. Diese Angaben können bestimmte Bedarfssituationen, Zeitpunkte der Ausführung des Auftrags oder auch andere Ereignisse beinhalten. Ebenso kann in der übermittelten Ergebnismeldung außer der Ausführungsbestätigung auch andere Mitteilungen, etwa über aufgefundene Informationen, die Qualität der gefundenen Lösung oder das Erreichen einer bestimmten Position, enthalten.

Es kommen auch durchaus eingeschränkte Formen von Dienstleistungsbeziehungen vor [11]. Hierbei stehen Dienstnehmer und Dienstgeber in einer einseitigen Relation. Eine dieser reduzierten Formen ist die Dienstbeauftragung *ohne Ergebnismeldung*. Sie findet Anwendung, wenn eine ordnungsgemäße Ausführung der erteilten Dienstaufträge grundsätzlich erwartet werden kann. Rückmeldungen an den Dienstnehmer gibt es höchstens, wenn der Dienstgeber selbst einen Fehler oder Störungen bei der Aufgabenlösung festgestellt hat.

Umgekehrt kann auch der Fall vorliegen, dass der Dienstnehmer nur dann mit dem Dienstgeber in Kontakt tritt, wenn er einen Auftrag ausgeführt hat. Es *fehlt* also eine besondere Dienstbeauftragung. Der Dienstgeber muss sich folglich selbst beauftragen. Er bestimmt also selbst, ob und unter welchen Umständen eine Dienstleistung durchzuführen ist, wird also von sich aus aktiv (proaktiv). Um festzustellen, wann der Dienstgeber aktiv werden muss, hat er seine Umgebung fortlaufend zu überwachen. Folglich muss er sie beobachten, die erlangten Beobachtungen analysieren und daraus Schlussfolgerungen ableiten. Dazu müssen ihm Kriterien bekannt sein, die ihm vor Arbeitsaufnahme durch Spezifikation zu übermitteln sind.

Die hier beschriebenen Formen der Dienstnehmer-Dienstgeber-Relation gibt es in verschiedenen Spielarten. So können bestimmte Dienste *mehren Dienstnehmern* zugänglich gemacht werden. Eine solche Lösung bietet sich an, wenn der Dienstgeber eine Leistung verspricht, die von breiterem oder sogar allgemeinem Interesse ist. Dieser Fall ist beispielsweise für Informationsdienstleister des Internets typisch. Umgekehrt können auch ganze *Teams von Dienstgebern* durch einen Dienstnehmer in Anspruch genommen werden, wenn eine *verteilte* Aufgabe zu lösen ist. Die Mitglieder solcher Teams sind dann möglicherweise Spezialisten, die den Dienstnehmer durch die autonome Lösung bestimmter Teilaufgaben unterstützen. Denkbar ist aber auch, dass die verschiedenen Dienstgeber vom Dienstnehmer in wechselnder Folge in Anspruch genommen werden. Die Auswahl der Dienstgeber bzw. Reihenfolge ihrer Benutzung wird dann von der Spezifik der Aufgabe oder auch vom Ergebnis des zuletzt aktiven Dienstgebers bestimmt. Dem Dienstnehmer obliegt dann die anspruchsvollere Aufgabe der Analyse der Ergebnisse und Entscheidung zugunsten eines der Kandidaten.

Für die Beschreibung des Zusammenwirkens von Dienstnehmern und Dienstgebern ist das *Client-Server-Modell* bestens geeignet. Der Dienstnutzer (benutzende Person oder Agent) wird hier *Client* genannt. Dieser nimmt die Leistungen eines Dienstgebers in Anspruch, der als *Server* bezeichnet wird. Dieses Bild passt besonders auf Rechner, die in einer Client-Server-Relation stehen. Die Übernahme dieses Modells ist hier dadurch gerechtfertigt, als die Agentenfunktionalitäten auf Rechnerplattformen implementiert sind. Die Interaktion zwischen den Client- und Serverrechnern erfolgt auf informationeller Ebene. Dazu bedarf es einer geeigneten *Kommunikations-Infrastruktur*, die vielfach die Form eines Kommunikationsnetzwerks besitzt. Client-Server-Systeme sind somit durch die in **Bild 2-2** dargestellte Architektur gekennzeichnet.

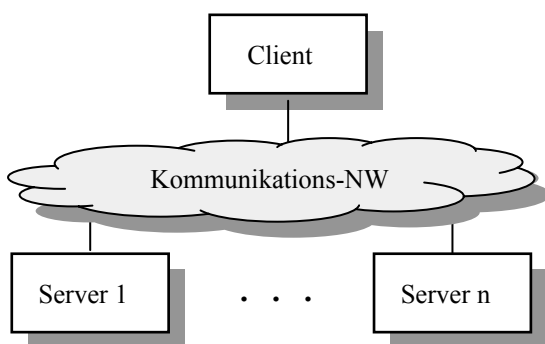


Bild 2-2 Architektur eines Client-Server-Systems

2.3. Fähigkeiten von Agenten

Zum besseren Verständnis werden wir nachfolgend die Betrachtungen zu den Fähigkeiten von Agenten vertiefen und erweitern.

2.3.1. Autonomie

Der Begriff der Autonomie ist aufs engste mit dem des Agenten verbunden. Er bezeichnet die Fähigkeit von Agenten, weitgehend *selbständig* zu handeln, um die geforderte *Zielstellung* zu erreichen. Autonomie bedeutet, dass Agenten die jeweils übernommene Aufgabe entsprechend den Vorstellungen, Anweisungen, Interessengebieten etc. ihrer Auftraggeber völlig eigenständig, d. h. ohne jeden Schritt mit dem Benutzer abstimmen zu müssen, lösen. Dazu müssen sie auch in der Lage sein, die Wirkungen ihrer Handlungen selbst zu kontrollieren, um daraus Schlussfolgerungen für weitere zielgerichtete Aktivitäten zu ziehen. Nach Erreichung des gestellten Zieles sind die erlangten Ergebnisse dem Auftraggeber in geeigneter Form zu präsentieren.

Autonomes Handeln hat zur Folge, dass bestimmte *Befugnisse* des Benutzers auf den Agenten übertragen werden. Gelegentlich kann es aber auch notwendig sein, die Befugnisse des Agenten zu begrenzen. So wird sich der Benutzer etwa bestimmte Befugnisse selbst vorbehalten, wenn damit rechtliche oder finanzielle Konsequenzen verbunden sind.

2.3.2. Reaktivität

Die Interaktion der Agenten mit ihrer Umwelt vollzieht sich durch ein Wechselspiel von Informationen und aufeinander bezogenen Handlungen zwischen verschiedenen Teilsystemen. Diese Teilsysteme unterschiedlicher Art werden zur *Umgebung* des Agenten gezählt.

Der Begriff *Reaktivität* bezeichnet die Fähigkeit, auf Einflüsse oder Informationen der Umwelt angemessen zu reagieren. Solche externen Einflüsse werden zumeist indirekt mittels geeigneter Sensorik erfasst oder können auch Informationen darstellen, die von anderen Quellen bereit gestellt und durch Kommunikation übermittelt werden.

Die Art und Weise wie ein Agent auf seine Umgebung reagiert, wird wesentlich davon bestimmt, ob er über ein *Wissen* von seiner Umwelt verfügt oder nicht. Existiert kein Wissen, so wird das Handeln des Agenten wesentlich durch *Suchprozesse* bestimmt sein. Suche bedeutet hier die mehr oder weniger zufällige Auswahl von Handlungsalternativen, deren Auswirkungen dann sensorisch überwacht werden. In diesem Fall spricht man von echt reaktiven Agenten.

Agenten, die auf Wissen zurück greifen können, besitzen dies zumeist in irgendeiner Art von internem Umweltmodell. In solchen Modellen werden bestimmte vom Agenten benötigte Einzelaspekte der Umwelt abgebildet. Diese Modelle werden in einer von Maschinen auswertbaren Form (bspw. digitalen Karte) abgelegt. Systeme, die über derartige Modelle verfügen, werden als deliberative Agenten bezeichnet [5]. Bei Feststellung einer aktuellen Situation kann dann durch Befragung des internen Modells eine im Sinne der Zielstellung günstige oder womöglich gar optimale Reaktion bestimmt und an die Außenwelt ausgegeben werden. Deliberative Agenten besitzen somit ein wesentlich effektiveres Verhalten als echt reaktive.

2.3.3. Proaktivität

Unter dem Begriff Proaktivität versteht man die Fähigkeit, auch selbständig *Initiativen* zu ergreifen, wenn ein Handlungsbedarf erkannt wird. Damit wird nicht nur auf die Umwelt reagiert, sondern auch aktiv auf deren Gestaltung eingewirkt. Diese Einflussnahme erfolgt in dem Sinn, eigene *Ziele* zu verwirklichen. Proaktivität und *Zielorientierung* sind daher gleichgerichtete Fähigkeiten.

Proaktives Verhalten von Agenten wird wesentlich von deren *Intelligenz* bestimmt. In einfachen Fällen beschränkt sich das proaktive Verhalten auf die Überwachung bestimmter Informationsquellen und Aktivwerden bei Feststellung von Änderungen. Echt proaktive Agenten mit höherer Intelligenz beherrschen ein komplexes Zielsystem mit einer Vielzahl von Teilzielen. Die Teilziele werden je nach festgestellter Situation einzeln verfolgt, um die Lösung der Gesamtzielstellung näher zu bringen.

2.3.4. Interaktion und Kommunikation

Agenten treten intern sowie mit ihrer Umgebung in verschiedene Wechselbeziehungen, die häufig nur schwer durchschaubar sind. Hierbei lässt sich zwischen zwei wesentlichen Formen der Interaktion unterscheiden:

- **Informationelle Interaktion**

Anknüpfend an die bereits genannte Fähigkeit zur Interaktivität befassen wir uns hier zunächst mit der Art und Weise, wie diese Interaktionen ausgeübt werden können. Hier erweist es sich als zweckmäßig, zwischen der informationellen und physikalischen Interaktion zu unterscheiden.

Beleuchten wir zunächst die *informationelle Interaktion*, so bezieht sich diese auf den Austausch, also Transport informeller Größen zwischen verschiedenen Instanzen. Diese Art der Interaktion wird *Kommunikation* genannt. Die Agentenfunktionalität erfordert erweiterte Kommunikationsformen. Dazu gehört, dass Signale oder auch Nachrichten (Botschaften) ausgetauscht werden.

Damit sich die Kommunikationspartner verstehen können, müssen gewisse Vereinbarungen getroffen werden, die in *Protokollen* zum Ausdruck kommen. Der Inhalt der Kommunikation kann sich auf unterschiedliche informationelle Sachverhalte beziehen. Dazu zählen Daten, Steuersignale, Nachrichten (Botschaften) und sogar Programme.

Agenten sind zur Erfüllung ihrer Aufgaben auf die Existenz einer funktionsfähigen Kommunikationsinfrastruktur angewiesen. Darüber verschaffen sie sich den Zugriff auf fremde Informationsressourcen und damit auf Informationen, über die sie nicht selbst verfügen. Die Kommunikation erfolgt entweder durch direkten Austausch von Nachrichten oder über sog. *blackboards*, auf die unabhängig zugegriffen werden kann. Das möglichst leistungsfähige Kommunikationsnetzwerk wird nicht – wie in den klassischen Anwendungen – passiv genutzt. Vielmehr wird sein Zustand aktiv verfolgt, um auf Änderungen selbständig reagieren zu können. In diesem Zusammenhang wird von einem netzwerkbewussten Verhalten (*network aware system*) gesprochen.

Innerhalb dieses Netzwerkes fungieren verschiedene Instanzen als Quelle und Senke von Informationen. Die Informationsübertragung zwischen den Instanzen erfolgt entweder auf direktem Weg oder unterbrochen durch die Zwischenschaltung eines sog. *Blackboards*. Beim Nachrichtenaustausch über ein Blackboard müssen die Kommunikanten nicht miteinander synchronisiert werden.

Der Aufbau eines Kommunikationsnetzwerks erfordert die Verwendung eines Übertragungsmediums sowie das Vorhandensein medienspezifischer Sender und Empfänger auf Seiten der Kommunikationsteilnehmer. Das Kommunikationsmedium stellt ggf. mehrere Übertragungswege, sog. *Kanäle*, bereit. Für die Realisierung dieser Kommunikationskanäle kommen sowohl *leitungsbehaftete* (Draht-, Koaxial- Lichtwellenleiter) als auch *leitungsfreie* Medien (Infrarot-, Funk-, Richtfunk-, Laserstrecke) in Betracht. Leitungsfreie Übertragungsmedien werden vor allem für die Kommunikation mobiler Agenten benötigt.

Der Transport von Waren ist der Übertragung von Informationen dem Prinzip nach ähnlich, da dieser den gleichen Anforderungen unterliegt. Jedoch ist in diesem Bereich die Verwendung des Kommunikationsbegriffs nicht üblich.

Einige Besonderheiten bietet der Informationsaustausch beim Gebrauch von Agenten in einer *prozesstechnischen Umgebung*. Hierbei handelt es sich um Interaktionen von Systemen aus unterschiedlichen Welten, nämlich einer technischen Anlage und einem Rechner. Dafür werden Zwischenglieder in Form von Sensoren und Aktuatoren benötigt, damit der Prozesszustand beobachtet bzw. beeinflusst werden kann. Diese werden benötigt, um Prozesszustände zu erfassen bzw. zu verändern. Zur Herstellung einer Kompatibilität dieser Einrichtungen mit dem Steuerungscomputer werden sog. Prozessschnittstellen (Interface-Karten) benutzt, die physisch mit dem Rechner verbunden sind. Die darüber geführte Kommunikation erfolgt i. a.

leitungsgebunden in Form von Zweidrahtleitungen. Komplexere Systeme können auch über elektronische Netzwerke kommunizieren, die zumeist den Charakter von Bussystemen haben.

- **Physikalische Interaktion**

Bleibt noch die Betrachtung der Interaktionen besonders der technischen Agenten mit ihrer physikalischen Umgebung bzw. untereinander. Diese können den Gebrauch gemeinsamer Gegenstände, die Übergabe von Gegenständen (Werkstücke, Werkzeuge) u. a. betreffen. Dabei entstehen physikalische Effekte (Kräfte, Momente), denen beide Interaktionspartner unterliegen. Diese Variablen werden zu ihrer Berücksichtigung im Agentenverhalten über Sensoren erfasst und somit wiederum auf informationeller Ebene abgebildet.

Um sich beim Entwurf der Agenten-Software von den implementations-spezifischen Details der Kommunikation zu entlasten, bedient man sich vorteilhafter Weise des aus 7 Schichten bestehenden OSI- (*open system interconnection*) Modells [6]. Dieses besitzt eine hierarchische Struktur. Jede Schicht stellt der darüber liegenden eine festgelegte Anzahl ausgewählter Dienste zur Verfügung. Die Verständigung wird jeweils über exakt spezifizierte Protokolle geregelt. Die Nutzung dieses Modells entlastet den Systementwickler von der Berücksichtigung der Spezifik des jeweils gewählten Übertragungsmediums, den zu treffenden Maßnahmen zur Übertragungssicherung, der benötigten Organisation zur Versendung von Datenpaketen u. a. m.

Die intelligenten Agenten sind in der Regel in der Anwendungsschicht, also obersten Ebene, angesiedelt. Häufig besteht noch eine Untergliederung in weitere Subschichten. Diese beherbergen diverse agentenspezifische Funktionen, wie Kooperation, Mobilität u. a. und weisen einen unterschiedlichen Abstraktionsgrad auf. Die Verknüpfung erfolgt über spezielle Anwenderprotokolle.

2.3.5. Koordination, Kooperation und Konkurrenz

Beim Auftreten mehrerer Agenten kann es zu Situationen kommen, die durch Koordination, Kooperation und Konkurrenz geprägt sind.

- **Koordination**

Dieser Fall tritt ein, wenn Prozesse an verschiedenen Orten verteilt sind und sich hinsichtlich ihrer Auswirkungen wechselseitig beeinflussen. Dies ist typisch für *nebenläufige* Prozesse, die mit eigener Dynamik asynchron und streckenweise parallel ablaufen. Damit die von einander unabhängigen Prozesse über Prozessgrenzen hinaus zusammenwirken können, müssen sie aufeinander abgestimmt, also koordiniert (synchronisiert) werden. Dadurch werden die nebenläufigen Prozesse in eine Reihenfolge gebracht. Unter der Wirkung der Koordination koppeln sich die verteilten Prozesse dynamisch miteinander und lösen sich später wieder auf. Dabei werden verteilte dynamische Architekturen gebildet.

Koordination bedeutet, dass einzelne Prozesse angestoßen, während andere vorübergehend in den Wartezustand versetzt werden. Dieser Zustand dauert solange an, bis ein erwartetes Ergebnis vorliegt bzw. ein bestimmtes Ereignis eingetreten ist.

Neben der *zeitlichen* Koordination kann auch eine *räumliche* geben. Dies ist beispielsweise erforderlich, wenn ein mobiler technischer Agent erst an seinem vorbestimmten Platz ankommen muss, ehe er mit der Ausführung seiner Aktion beginnen kann.

Koordination kann auf symbolische oder bei technischen Agenten auch auf physikalische Weise erreicht werden. So werden etwa Verkehrsströme in Strassen- oder auch Schienennetzen üblicherweise durch Lichtsignale koordiniert. Die Koordination verschiedener Verkehrsträger an Bahnübergängen erfolgt hingegen physisch mittels Schranken.

- **Kooperation**

Das Zusammenwirken von Prozessen kann durch Kooperation oder durch Konkurrenz geprägt sein [7].

Kooperation liegt vor, wenn das Zusammenwirken von Teilprozessen der Erfüllung einer *gemeinsamen Zielstellung* dient. Die individuellen Ziele sind somit einem Globalziel unterzuordnen. Es lassen sich zwei unterschiedliche Formen der Kooperation feststellen, nämlich

- *einseitige Kooperation*

Ein Prozess liefert einseitig Daten an einen anderen Prozess, die dieser aufnimmt und verarbeitet. Es liegt eine *Produzenten-Konsumenten-Relation* vor.

- *wechselseitige Kooperation*

Der mit Daten belieferte Prozess erzeugt nach entsprechender Verarbeitung neue Daten, die er an den vorgelagerten Prozess wieder zurück sendet. In diesem Fall besteht eine *Auftraggeber-Auftragnehmer-Relation*.

Der bei Agenten zumeist vorliegenden Auftraggeber-Auftragnehmer-Relation wird durch die Verwendung eines *Client-Server-Modells* entsprochen. Im Gegensatz zu den klassischen Anwendungen dieses Modells nutzen Agenten diese Architektur dynamisch. Das bedeutet, dass in Abhängigkeit von der aktuellen Situation die Rolle von Client und Server wechselt. So kann beispielsweise ein Agent in einem Fall bestimmte Dienste anbieten, also Server sein, während zu einem anderen Zeitpunkt bei ihm nach Dienstleistungen nachgefragt wird, d. h. der Agent als Client auftritt. Dieses Wechselspiel erfordert die Verwendung leistungsfähiger Kommunikationsmechanismen.

- **Konkurrenz**

Das Verhalten der *Konkurrenz* tritt auf, wenn einzelne nebenläufige Prozesse oder Agenten untereinander in *Wettbewerb* treten, Konkurrenzsituationen treten auf, wenn individuelle Zielstellungen bestehen, die einander entgegen gerichtet sind. Hier wird der Blick auf faire Konkurrenz gerichtet. Aggressive Konkurrenz, wie man sie in menschlichen Gemeinschaften beobachten kann, wird hier nicht berücksichtigt.

Konkurrenzsituationen entstehen beispielsweise beim Bemühen nebenläufiger Prozesse um den gleichzeitigen Zugriff auf einen bestimmten Datenbestand. In anderen Fällen wird um den Zugang zu einer knappen Ressource oder vielleicht auf den Zuschlag für eine ausgeschriebene Dienstleistung gerungen.

Konflikte, die zu einer Konkurrenzsituation führen, müssen aufgelöst werden. Die Entscheidung kann beispielsweise nach festgelegten *Prioritäten* geschehen, die einer hierarchischen Ordnung entstammen. Eine Alternative besteht darin, dass sich die Agenten an eine unabhängige Instanz wenden und um Entscheidung bitten. Fehlt diese Möglichkeit, dann können noch zwischen den Agenten *Verhandlungen* geführt werden. Dabei sollen die Aktivitäten untereinander abgestimmt werden, so dass es zu einem fairen Ausgleich der Interessen kommt.

2.3.6. Intelligenz und Lernen

- **Intelligenz**

Zu den essentiellen Merkmalen von Agenten gehört der Grad der implementierten Intelligenz. Intelligenz umfasst ein nach oben hin offenes Spektrum an kognitiven Fähigkeiten, die durch Begriffe wie *Beobachten*, *Erkennen*, *Entscheiden*, *Planen*, *Problemlösen* und auch *Lernen* gekennzeichnet sind [8].

Bezogen auf Agenten versteht man unter seiner Intelligenz die Art und Weise, in der diese ihre Aufgaben lösen. Dazu gehört, aufgabenbezogenes Wissen und aktuell gewonnene Informationen aufgabengerecht zu interpretieren um schlussfolgernd daraus Entscheidungen für eigenes aktives Handeln im Sinne der Zielstellung abzuleiten. Die Intelligenz von Agenten kann je nach Aufgabenstellung und funktionellem Vermögen in weiten Grenzen variieren. Dementsprechend besteht eine große Spannbreite im Leistungsvermögen von Agenten [9], [10].

Die Verkörperung künstlicher Intelligenz manifestiert sich in Programmen, die kognitive Merkmale aufweisen. Diese bedürfen zu ihrem Wirksamwerden einer Implementierung durch eine Rechnerplattform. Man spricht daher auch von *maschineller Intelligenz*. Für die Implementierung kann ein Einzelrechner oder ggf. auch ein Rechnernetzwerk eingesetzt sein. Auf diesem laufen dann auch die benötigten Steuerungs- und Regelungsroutinen. Auf die notwendige Ergänzung solcher Computer durch ein Prozess- und Kommunikations-Interface wurde bereits hingewiesen.

Intelligentes Verhalten gründet sich auf das Vorhandensein aufgabenbezogenen *Wissens*, welches eine höhere Form von Information darstellt. Wissensbasierte Systeme im Sinne der *Künstlichen Intelligenz (KI)* bzw. *Artificial Intelligence (AI)* benutzen dafür eine Metapher, die durch das Vorhandensein einer Wissensbasis und einer Schlussfolgerungskomponente (*inference mechanism*) gekennzeichnet ist. Das vorhandene Systemwissen kann in der Wissensbasis in verschiedener Form (bspw. Produktionsregeln, Frames, Constraints) hinterlegt sein.

Im Falle der *regelbasierten Systeme* wird Wissen in Form von *Fakten* und (Produktions-) *Regeln* repräsentiert, die in der *Wissensbasis* niedergelegt sind. Dieses Wissen muss dem intelligenten System von außen (bspw. durch Befragen von Experten) über eine Wissenserwerbskomponente eingegeben werden, kann aber auch durch *Lernen* erworben, verändert oder erweitert werden. Die *Schlussfolgerungskomponente* bearbeitet Anfragen an die Wissensbasis und erzeugt durch logische Deduktion angemessene Antworten, welche wiederum von der wissensverarbeitenden Komponente ermittelt werden. Diese Ausgaben beziehen sich im vorliegenden Fall auf die vorzunehmenden Handlungen.

Ein andere wesentliche Kategorie intelligenter Systeme sind *Neuronale Netze*. Hierbei handelt es sich um lernfähige Netzwerke, die einfachen Gehirnstrukturen nachempfunden wurden. Das Wissen ist in diesem Fall in den Neuronen dieser Netzwerke verteilt gespeichert. Weiterhin existieren auch rein agentenbasierte Ansätze für intelligente Systeme.

Zum Verhalten von Agenten gehören auch klassische Funktionalitäten. Technische Agenten, insbesondere autonome Roboter, benötigen u. U. eine Vielzahl von Steuerungen und Regelungen. Diese Funktionalitäten werden nicht zu den Intelligenzleistungen gerechnet. Eine Übergangsform stellt adaptives Verhalten dar. Agenten, die darüber verfügen, sind in der Lage, sich langsam wechselnden Bedingungen, etwa Veränderungen ihrer Umwelt, anzupassen.

- **Lernen**

Eine höhere Form der Intelligenz ist das (maschinelle) Lernen. Hierunter versteht man die Fähigkeit, im Dialog mit der Umgebung oder dem Benutzer erworbene Erfahrungen auszuwerten, um damit neues, aufgabenbezogenes Wissen zu erwerben, vorhandenes Wissen zu modifizieren sowie auch irrelevantes Wissen zu vergessen.

Innerhalb des Lernens lassen sich verschiedene Formen unterscheiden [8]. Die einfachste Art ist das Lernen durch *Belehrung*. Dafür wird ein (externer) Lehrer benötigt, der vorgibt, was zu erlernen ist. Eine abgeschwächte Form ist das Lernen mit *Bekräftigung*. Hier wird das Lernen je nach Ergebnis entweder belohnt oder bestraft. Es sei noch das *Selbstlernen* genannt. Das Lernen erfolgt hier durch das Wechselspiel von Versuch und Irrtum (*trial and error*). Derartige Systeme benötigen eine Komponente zum Erwerb von Wissen und damit Erstellung einer Wissensbasis.

Für Agenten ist die Fähigkeit des Lernens beispielsweise nützlich, um Wissen über eine a priori unvollständig bekannte bzw. völlig unbekannte Umwelt zu erlangen, um dieses zur Bildung oder zum Updating des internen Modells einzusetzen. Auf dieser Grundlage können sie ihre Wirkungsweise bzw. Effizienz ständig verbessern und vervollkommen. Eine andere Eigenschaft lernfähiger Agenten kann darin bestehen, sich den Gewohnheiten ihrer Nutzer anzugleichen und damit ein bestimmtes Nutzerprofil zu erlangen. Auf diese Weise können sich solche Agenten zu persönlichen Assistenten entwickeln. Lernfähige Agenten sind somit in der Lage, ihr Verhalten im Verlauf der Tätigkeit zielorientiert zu verbessern. Man kann ihnen daher das Merkmal der Entwicklungsfähigkeit zusprechen.

3. Spezielle Agenten und Systeme

3.1. Arten von Agenten und Agentensystemen

Folgt man der in [3] verwendeten Taxonomie, so können Agenten bzw. Agenten-Systeme in folgende Kategorien eingeordnet werden:

- **Menschliche Agenten**

Benutzer wenden sich an menschliche Agenten, um deren Fachkompetenz in Anspruch zu nehmen zur Lösung einer komplexen, aus vielen Einzelschritten bestehenden Aufgabe. Dazu übermitteln die Auftraggeber ihre mehr oder weniger spezifizierten Wünsche an Agenten und erhalten nach entsprechender Bearbeitung von diesen Lösungsvorschläge.

Dieses Vorgehen lässt sich am Beispiel des Buchens einer *Ferienreise* in einem Reisebüro gut illustrieren. Von dem Agenten (*travel agent*) erwartet der Kunde, dass er alle mit der Reisebuchung in Zusammenhang stehenden Aufgaben kompetent, zuverlässig und schnell erledigt. Zu der darauf hin einsetzenden Tätigkeit des Agenten gehört das Sammeln relevanter Informationen aus verschiedenen Quellen (Kataloge, Pläne etc.), die Auswahl (Filterung) günstiger Angebote der Komponenten (Ferienort, Hotel, Flugverbindung etc.) sowie die Zusammenstellung und Buchung einer günstigen Gesamtlösung. Das Ergebnis wird dem Kunden in geeigneter Form übermittelt (Reiseplan, Tickets, Voucher etc.)

- **Hardware-Agenten**

Hardware-Agenten sind technische Gebilde, welche dementsprechend auch *Technische Agenten* genannt werden [11]. Dabei handelt es sich um gebaute Einrichtungen, die in einer real vorhandenen, physikalisch geprägten Umwelt autonom aktiv sind. Bei den auftretenden Interaktionen gelangen somit Größen physikalischer Art, wie Massen, Kräfte und Momente, und ggf. auch geometrische Größen und Sachverhalte (Position, Orientierung, Abstand; Abmessungen, Arbeitsraum etc.) mit ins Spiel.

Fortgeschrittene Hardware-Agenten beobachten und analysieren die Gewohnheiten ihres Benutzers und erlernen mehr und mehr, die von ihnen verlangten Handlungen in der gewünschten Weise und evt. sogar unaufgefordert zu erledigen. Indem sie sich ihrem Partner immer mehr angleichen werden sie zunehmend zu *persönlichen Agenten*.

- **Software-Agenten**

Software-Agenten – oder wie sie auch genannt werden – Informationsagenten sind symbolische Wesen, die auf einem oder mehreren Rechnern beheimatet sind. Es handelt sich hier um verteilte, über ein Informationsnetzwerk interagierende intelligente Software-Systeme, die im Auftrag ihres Anwenders Aufgaben informationeller Art ausführen und ihre Ergebnisse benutzerfreundlich präsentieren.

Ein typisches Beispiel für die Verwendung von Software-Agenten sind *Informationsagenten*, welche die gezielte Suche und Auswahl bestimmter Informationen aus dem *Internet* unterstützen. Der Benutzer soll mit solchen Diensten von dem mühevollen und oft langwierigen Durchforsten der im *World Wide Web* angesammelten gewaltigen Informationsbestände entlastet werden. Dafür werden von den verschiedenen Betreibern sog. Web-Suchagenten, wie *Yahoo*, *Google* u. a. bereit gestellt. Diese können jedoch mit der explosionsartigen Vermehrung der ins Netz gestellten Informationen kaum Schritt halten, so dass immer neue, leistungsfähigere Suchagenten hinzu kommen.

Eine andere Untergliederung ergibt sich, wenn das Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein der zusätzlichen Merkmale in den Vordergrund rückt. Dementsprechend unterscheidet man:

- **Stationäre versus Mobile Agenten**

Diese beiden Kategorien von Agenten unterscheiden sich – wie bereits an anderer Stelle ausgeführt – in der Fähigkeit ihres Selbsttransports. Beide Agententypen können sowohl bei menschlichen als auch informationellen und technischen Agenten vorkommen.

- **Einzel-Agenten versus Multi-Agenten-Systeme**

Maßgebend für die Klassifikation ist in diesem Fall die Gegenüberstellung von Einzelwesen und Gemeinschaften. Auch diese Formen sind in allen vorgenannten Kategorien anzutreffen. So kann auch eine Personengruppe tätig sein, um eine gestellte Dienstleistungsaufgabe zu lösen. Ebenso ist es möglich, dass mehrere Software-Agenten verschiedene Suchmaschinen bei der Informationssuche in Anspruch nehmen. Schließlich ist bekannt, dass nicht selten mehrere intelligente autonome Roboter tätig sind, um eine komplexe Handhabungs- und Arbeitsaufgabe gemeinschaftlich zu lösen.

3.2. Mobile Agenten

Mobilität ist eine Fähigkeit, die ein Agent besitzen kann aber nicht notwendigerweise muss. Dementsprechend ist zwischen *mobilen* und *stationären* Agenten zu unterscheiden.

Die Definition *mobiler Agenten* lässt sich auf folgende kurze Formel bringen [12]:

Mobile Agenten sind Agenten, die in der Lage sind, sich selbst – mit allem was dazu gehört – zu transportieren.

Mobile Agenten können von Ort zu Ort reisen, was auch als *Migration* bezeichnet wird. Bei diesen Wanderungen werden die zur Ausführung ihres Auftrags benötigten Informationen und auch Wissen aufgesammelt, gespeichert und zielgerichtet in Handlungen umgesetzt. Mobile Agenten befinden sich in einer *Umwelt*, in der sie sich bewegen können. Mit dem Reisen von Agenten verändert sich ihre unmittelbare Umgebung. Mobilität zeigt sich je nach Erscheinungsform der Agenten auf unterschiedliche Weise.

Bei *mobilen Software-Agenten* erscheint die Umwelt, durch die sie reisen können, zumeist in Gestalt eines elektronischen Netzwerkes. *Mobile Software-Agenten* reisen über ein Kommunikationsnetz mit hinreichender Überdeckung zwischen verschiedenen Computern.

Anschaulicher ist der Mobilitätsbegriff für *mobile technische Agenten*, Diese bewegen sich mehr oder weniger freizügig in einer realen, geometrisch bestimmten 2- oder 3-dimensionalen technischen Welt. Zu den ortsfesten Einbauten und Hindernissen kommen bei Multi-Agenten-Systemen noch bewegliche, die durch die anderen Agenten gebildet werden. Die Bewegungsmöglichkeiten von Agenten sind somit mehr oder weniger eingeschränkt. In derartigen Bewegungsräumen müssen sich die mobilen Agenten zunächst nach Raum und Zeit orientieren, ehe sie ihre Bewegungen planen und ausführen können. Aus ihrer Bewegung in der realen Welt ergeben sich auch physikalische

Interaktionen, die sowohl die Umgebung (vorhandene Wände, Hindernisse) als auch andere mobile Agenten betreffen können. Mobile technische Agenten können während ihrer Wanderungen auch auf unerwartete Hindernisse treffen. Kommt es dabei zu Kollisionen, so können u. U. große Schäden auftreten. Daher erlangt das Problem der Kollisionsvermeidung hier einen hohen Stellenwert. Mobile technische Agenten bewegen sich somit in einem geometrisch definierten Raum, der i. a. durch Einbauten eingeschränkt ist bzw. mehr oder weniger mit Hindernissen durchsetzt ist.

Mobile Agenten müssen mit ihrer Umgebung aus verschiedenen Anlässen kommunizieren können. Zu dieser Umgebung können auch andere Agenten gehören. Mobile Agenten, die einer informationellen Welt angehören, kommunizieren zumeist über ein leitungsgebundenes elektronisches Netzwerk. Mobile Agenten technischer Art hingegen benötigen angesichts ihrer Beweglichkeit ein leitungsfreies Übertragungsmedium, das eine *Mobilkommunikation* ermöglicht (s. Abschn. 2.2.). Dieses Mobilkommunikationssystem sollte den gesamten potenziellen Bewegungsraum des bzw. der Agenten überdecken.

Mobile Agenten müssen mit Mitteln ausgestattet sein, um sich autonom bewegen zu können. Diese sind bei mobilen Software-Agenten völlig unspektakulär. Mobile technische Agenten hingegen benötigen für das Reisen einen eigenen *Bewegungsapparat* samt Antrieb.

Agenten werden mit Mobilität ausgerüstet, wenn dies ihre Aufgaben verlangt oder auch deren Lösung erleichtert bzw. effektiver gestaltet. Dafür kann es verschiedene Gründe geben. So kann es beispielsweise notwendig sein, einen Agenten zunächst an die Plätze zu bringen, an denen seine Aktivitäten verlangt werden. Die Aufgabe eines mobilen Agenten kann selbst in der kollisionsfreien Bewegung in einer unbekannten Umwelt bzw. im (sicheren) Transport von Gütern bestehen. Ein weiteres Argument kann darin bestehe, die Aufgabenlösung dorthin zu delegieren, wo die dafür nötigen Ressourcen vorhanden sind.

Mobile Agenten sind in besonderem Masse sicherheitsgefährdet. Daher verfügen sie über spezielle Techniken zur Abwehr von Bedrohungen. Zum eigenen Schutz können auch verschiedene öffentliche Sicherheitsdienste in Anspruch genommen werden.

Stationäre Agenten sind erwartungsgemäß an eine ortsfeste Realisierung gebunden. Ist der Mobilitätsbegriff nicht in der Bezeichnung enthalten, so handelt es sich zumeist um stationäre Agenten.

3.3. Multi-Agenten-Systeme

Agenten können als Einzelwesen existieren aber auch in Gemeinschaften leben, also *Organisationen* bilden. Im zuletzt genannten Fall ergeben sich *Multi-Agenten-Systeme (MAS)*. Handelt es sich hierbei um Software-Agenten, dann besteht ein verteiltes System, das wahlweise auf einer oder auch mehreren Rechnerplattformen laufen kann. Zur Lösung der ihnen übertragenen Aufgaben werden komplexere Strukturen (Teams) gebildet, wobei der Zusammenschluss der Agenten vorübergehend oder dauerhaft sein kann. Kennzeichnend ist daher eine gewisse soziale Organisationsfähigkeit verbunden mit der Bildung von Strukturen (Organisationen). Während des gemeinschaftlichen Wirkens der Agenten müssen deren Aktivitäten koordiniert werden.

Wir werden hier folgenden Definitionsversuch wagen:

Ein Multi-Agenten System bezeichnet eine Gesamtheit von Agenten, in der eine beschränkte Menge von Agenten aktiv ist, um dynamisch vergebene Aufgabenstellungen in einem bestimmten Umfeld zu lösen.

Der mit dem Übergang auf Gemeinschaften von Agenten entstandene *neue* Aspekt besteht darin, dass die autonomen Einzelwesen nun auch untereinander in Wechselwirkungen treten können. Die anderen Mitglieder der Gemeinschaft werden dann – vom Einzelwesen aus betrachtet – mit zu seiner

Umgebung gerechnet. Jeder Agent, der versucht, seine Problemlösung voran zu treiben, wird dabei Wirkungen auf andere Agenten verursachen.

Multi-Agenten-Systeme werden eingesetzt, wenn dies für die Aufgabenlösung vorteilhaft ist. Dazu lässt sich folgende Unterscheidung treffen:

- *Multi-Agenten-Systeme 1. Art*

Mehrere Agenten verfolgen die Lösung eigener lokaler Probleme mit individueller Zielstellung, wobei die Aktivitäten der einzelnen Agenten wechselseitig voneinander abhängig sind. Hierbei kann die Aufgabenlösung des einen Agenten die der anderen positiv oder negativ beeinflussen.

- *Multi-Agenten-Systeme 2. Art*

Mehrere Agenten schließen sich zusammen, um eine komplexe Aufgabe zu lösen, welche entweder das Vermögen eines einzelnen Agenten übersteigt oder gemeinschaftlich effektiver oder schneller bewältigt werden kann. Die Entscheidungen der beteiligten Agenten können in diesem Fall nicht mehr unabhängig voneinander getroffen werden, sondern unterliegen einer gemeinsamen (globalen) Zielstellung, die jedem einzelnen Agenten bekannt ist.

Die Aktivitäten der einzelnen Agenten müssen miteinander koordiniert werden. Dabei kann sowohl kooperatives als auch konkurrierendes Verhalten verlangt sein (s. Abschn. 2.3.).

Bei den Anwendungen 1. Art stehen Agenten eines Systems sozusagen als Einzelkämpfer untereinander im Wettbewerb. Das Wechselspiel der Agenten ist dort durch *Konkurrenz* geprägt. Jeder Agent ist auf die Erfüllung seiner individuellen Zielstellung bedacht, die der Zielerfüllung der anderen Agenten entgegen gerichtet ist. Bei solchen Konkurrenzsituationen handelt es sich vielfach um den Zugang zu einer gemeinschaftlich genutzten knappen Ressource. Solche Ressourcen können Speicherplätze, Übertragungskanäle, Fahrwege, aber auch die Zeit sein. Die umstrittene Ressource kann an den Antragsteller wahlweise sofort vergeben bzw. ihm vorüber gehend frei gehalten werden, oder es wird ihm der Verzicht geraten. Treten Agenten bezüglich der *Zeit* in Wettbewerb, so konkurrieren diese in einer Art von Wettlauf. Ein anderes Beispiel konkurrierenden Verhaltens ist das Ringen um den Zuschlag für eine ausgeschriebene Dienstleistungsaufgabe.

Konkurrierendes Verhalten verlangt Entscheidungen, die auf verschiedene Weise getroffen werden können. Die Konflikte können durch die Vergabe von *Prioritäten* gelöst werden. Eine andere Möglichkeit besteht in der Führung von *Verhandlungen*. Unter einer Verhandlung ist hierbei ein mehrschrittiger Prozess zu verstehen, der jedem Teilnehmer bzw. jeder Partei die Möglichkeit einräumt, den eigenen Ansatz zur Erreichung des individuellen Ziels zu optimieren. Diese Verhandlungen werden über die Versendung von Anfragen bzw. Angeboten sowie den Empfang von Aufforderungen, Zuschlägen oder auch Ablehnungen geführt. Agenten können die Verhandlungen untereinander führen oder sich auch an eine übergeordnete Instanz (Agentur) wenden, die dann nach übergeordneten Gesichtspunkten entscheidet.

Anwendungen der 2. Art verlangen ein gemeinschaftliches Vorgehen. Daher ist eine *Kooperation* der Agenten gefragt. Derart zusammenwirkenden Agenten wird daher eine soziale Kompetenz zugeschrieben. Die Einzelagenten unterwerfen sich einer globalen Zielstellung zu Lasten ihrer Eigenziele. Beispiele für den Einsatz solcher kooperativ wirkender Multi-Agenten-Systeme sind das gemeinschaftliche Suchen und Filtern von Informationen in mehreren verteilten großen Datenbanken, das Ausführen komplexer Handhabungs- und Arbeitsvorgänge durch mehrere Roboter oder das gemeinsame Transportieren großer Lasten.

Lösungsansätze für ein optimales Verhalten in Kooperations- und Konkurrenzsituationen bietet die *kooperative Spieltheorie*. Hierbei werden Varianten gebildet, die mit Kosten bewertet werden. Die erhaltene Optimallösung basiert dann auf einem Kosten-Nutzen-Vergleich.

Voraussetzung für die Verständigung der Agenten innerhalb des Systems ist das Vorhandensein einer leistungsfähigen *Kommunikations-Infrastruktur*, zu der alle Agenten Zugang haben. Über dieses Netzwerk werden nicht nur die benötigten Arbeitsdaten und Botschaften sondern auch Steuersignale zur Koordination der Prozesse ausgetauscht. Handelt es sich speziell um ein Mobiles-Multi-Agenten-System, dann ist eine Kommunikationslösung auf Basis eines leitungsfreien Mediums erforderlich, die den gesamten Bewegungsraum überdeckt.

Damit sich Agenten untereinander verständigen können, bedarf es auch einer gemeinschaftlich genutzten Kommunikationssprache. Mit Hilfe einer solchen *Agentenkommunikationssprache* kann ein Agent einen anderen Agenten zur Ausführung einer bestimmten Handlung veranlassen. Die resultierenden Ergebnisse werden dann auf gleiche Art zurückgemeldet. Diese Agentenkommunikationssprache sollte aber auch die Möglichkeit bieten, die benutzte Form der Wissensrepräsentation auszudrücken sowie Zielvorstellungen und Absichten zu übermitteln. Folglich muss die Agentenkommunikationssprache eine Art Metasprache sein, die auch für die Wissensrepräsentation fungiert. Es gibt mehrere Vorschläge für Agentenkommunikationssprachen, jedoch hat noch keine von ihnen bisher allgemeine Anerkennung erfahren.

Eine besondere Form von Multi-Agenten-Systemen sind *Agentenhierarchien*. Hierbei handelt es sich um geordnete Systeme von Agenten. Die Einzelwesen sind hierbei mit unterschiedlichen Fähigkeiten ausgestattet und bestrebt, eigene Teilziele aus einer Hierarchie von Zielen zu verwirklichen. Agentenhierarchien sind zumeist mit hochgradiger Intelligenz ausgestattet und erlauben so die Realisierung sehr effizienter Agentensysteme.

Bei den derzeit genutzten Multi-Agenten-Systemen verändert sich das Milieu, in dem die Agenten wirken, in der Regel nicht. Ebenso ist die Anzahl der Mitglieder, die in dieser Gemeinschaft leben, i. A. konstant. Solche Bedingungen sind jedoch nicht zwingend. Es sind durchaus auch Veränderungen des Umfeldes – etwa infolge von äußeren Einflüssen oder durch Abnutzung – zugelassen. Agentensysteme können auch bezüglich ihrer Mitgliederzahl offen sein. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, bedarfsweise weitere Agenten zu kreieren. Ansätze für dieses noch weitgehend im Forschungsstadium befindliche Gebiet liefert der Einsatz von Prinzipien der *Evolutionstechnik*. Solche erweiterten Bedingungen wird man beispielsweise zulassen, um die Auswirkungen biologischer Mechanismen, wie der Vermehrung und Auslese, zu studieren.

Eine Erhöhung der Komplexität von Multi-Agenten-Systemen entsteht, wenn die gemeinschaftlich autonom aktiven Agenten zusätzlich über die Fähigkeit der Eigenbewegung verfügen. Derartige Systeme werden erwartungsgemäß *Mobile-Multi-Agenten-Systeme (MMAS)* genannt. Die Mitglieder einer solchen Gemeinschaft können sich nun selbst transportieren. Dabei können je nach Konstellation auch Interaktionen zwischen verschiedenen mobilen Agenten auftreten. Multi-Agenten-Systeme, deren Teilnehmer nicht reisen können, haben stationären Charakter.

4. Technische-Agenten

4.1. Wesen und Besonderheiten

Technische Agenten sind gebaute Agenten und damit Objekte der realen Welt. Ihr äußeres Erscheinungsbild wird geprägt durch einen sog. *Agentenkörper*. Dabei handelt es sich um ein zweckbestimmtes, konstruktiv gestaltetes und materiell ausgeführtes Gebilde, das physikalischen Gesetzmäßigkeiten (Mechanik, Dynamik) unterliegt. Dies können, etwa bei Robotern, kinematische Strukturen sein, die eine relative Bewegungsmöglichkeit verschaffen. Um definierte Bewegungen zu ermöglichen, wird eine hohe Steifigkeit der Konstruktion verlangt.

Für Technische Agenten gelten zunächst die bereits genannten allgemeinen Merkmale, wie Autonomie (automatisches Reagieren und Agieren), Interaktion (wechselseitiges Zusammenwirken von Komponenten), Kommunikation (Übertragung und Transport von Informationen), Koordination

(zeitliche Abstimmung von Aktionen) und ggf. auch Mobilität (Selbsttransport des Agenten) (s. Kap. 2. u. 3.). Es bestehen jedoch eine Reihe wesentlicher Besonderheiten, auf die nachfolgend eingegangen werden soll.

Technische Agenten agieren und interagieren auf *physikalische* Art in einer technisch geprägten Umwelt und ggf. auch mit anderen technischen Agenten. Dabei bedienen sie sich technischer Betriebsmittel (Werkstücke, Werkzeuge, Antriebe etc.), wobei physikalische Effekte (Kräfte, Momente, Austausch von Energien) mit ins Spiel kommen.

Die physikalischen Interaktionen technischer Agenten sind auf sog. *Interaktionsräume* begrenzt [11]. Diese werden durch Systemgrenzen bestimmt, deren Geometrie durch die eigene Kinematik bestimmt wird. Die Interaktionsräume sind bei statischen technischen Agenten ortsfest. Bei mobilen technischen Agenten verlagern sich diese Räume mit der Agentenbewegung. Mobile Systeme agieren außerdem in einem durch die Umgebung definierten *Bewegungsraum*.

Technische Agenten müssen zur Erfüllung der ihnen übertragenen Aufgaben auch auf *informationeller* (symbolischer) Ebene agieren und interagieren. Die Wechselwirkungen betreffen hier die Beschaffung und den Austausch benötigter Informationen zwischen unterschiedlichen Komponenten des Agenten oder auch den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Agenten. Dieser Informationstransfer erfordert das Vorhandensein einer funktionsfähigen *Kommunikations-Infrastruktur*. Diese kann auf mehrere Ebenen verteilt sein und auch unterschiedliche Kommunikationsmedien benutzen.

Zur informationellen Komponente gehören weiterhin Betriebsmittel zur Informationsverarbeitung. Hierbei handelt es sich um das Vorhandensein eines Computers bzw. Computersystems hinreichender Leistungsfähigkeit (Hardware) mit einer Systemsoftware sowie diverser funktionsorientierter Programme (Anwendungssoftware). Letztgenannte realisiert erwartungsgemäß die Agentenfunktionalität, die häufig recht komplexe Steuerung sowie diverse andere benötigte Informationsverarbeitungsprozesse. Spezielle Programme sorgen für die integrierte Intelligenz des Agenten. In Anspielung darauf bezeichnen einige Autoren den für die Arbeitsweise eines Agenten benötigten Informationsteil als *Agentenkopf* [13].

Die physikalische Reaktion und Interaktion technischer Agenten erfolgt unter Zwischenschaltung von Sensoren und Aktuatoren. Diese bilden die Schnittstellen zwischen dem physikalischen und informationellen Teilsystem. Über diese Elemente vollzieht sich das Beobachten und Handeln technischer Agenten. Die Sensoren werden dazu gebraucht, um fortlaufend Informationen über den eigenen Zustand sowie Zustand der Umgebung unabhängig von Ort und Zeit zu liefern. In den sensorisch erfassten Informationen widerspiegelt sich neben Außenwelteinflüssen auch die Reaktion des Systems auf zuvor vorgenommene Handlungen des Agenten. Aktuatoren sind wiederum nötig, um zielorientiert auf den vorliegenden Zustand – sowohl des eigenen Agenten als auch der Umwelt – einzuwirken. Die ordnungsgemäße Ausführung von Handlungen eines Agenten wird ihrerseits häufig wiederum durch spezielle Sensoren überwacht.

Das Zusammenwirken der verschiedenen, auf Agentenkopf und –körper verteilten Komponenten technischer Agenten veranschaulicht die in **Bild 4.1** wiedergegebene Systemarchitektur.

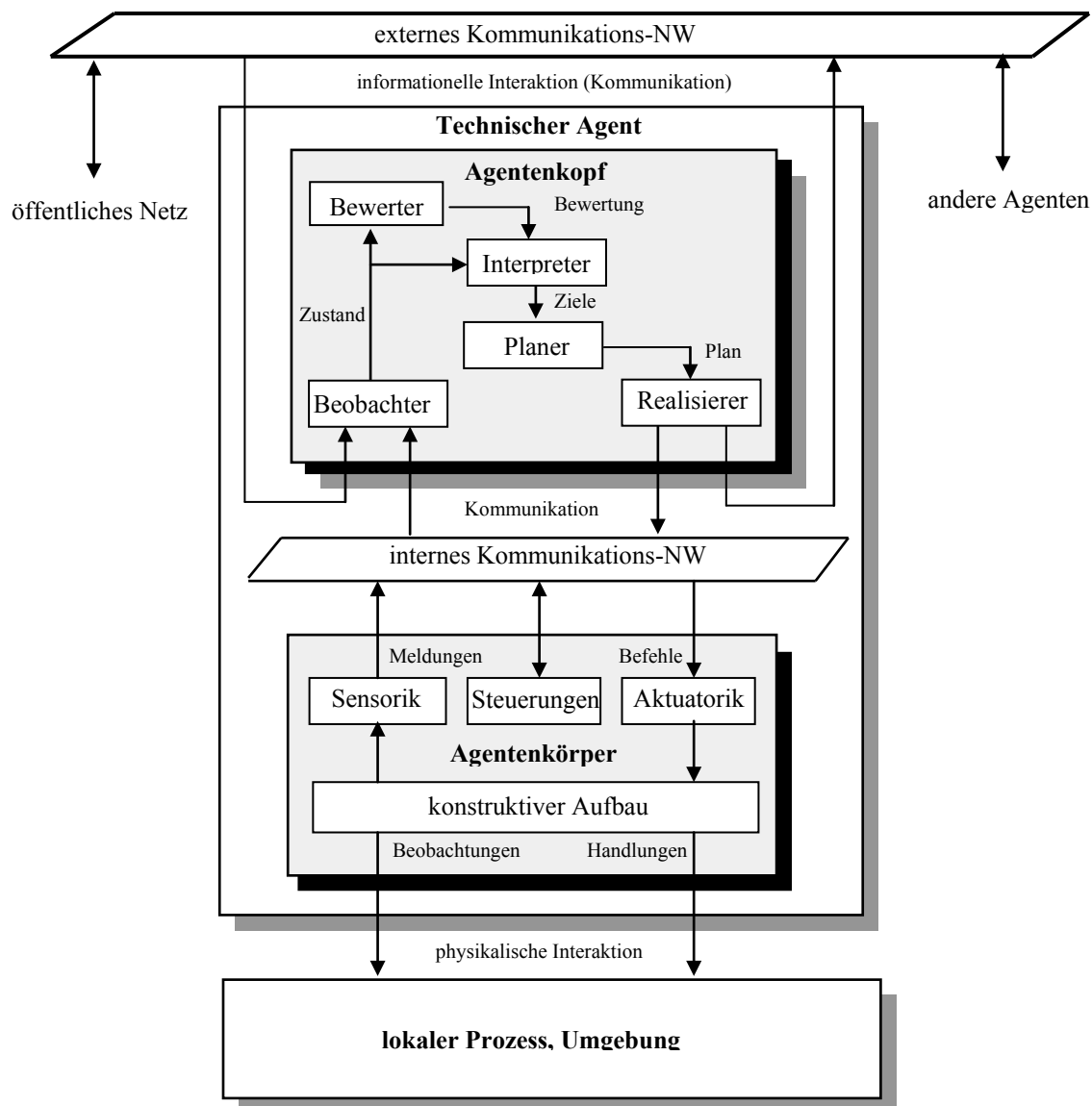


Bild 4.1 Architektur technischer Agenten

Die Anordnung widerspiegelt die bereits erläuterte Funktionsaufteilung zwischen Agentenkopf und -körper. Die informationelle Interaktion bzw. Kommunikation erfolgt über zwei Netzwerke. Über das interne Kommunikationsnetz, das in praxi die Form eines Bussystems besitzen kann, treten Agentenkopf und -körper in Informationsaustausch. Beide Teilsysteme stehen wiederum mit einem externen Kommunikationsnetzwerk im Informationsaustausch. An dieses können auch weitere Kommunikationsteilnehmer, wie andere technische Agenten oder ein öffentliches Netzwerk (bspw. Internet), angeschlossen sein. Die physische Interaktion mit dem technischen Prozess bzw. der Agentenumgebung erfolgt über die Sensorik und Aktuatorik unter Zwischenschaltung des konstruktiven Teils.

Die Kette von wechselndem Beobachten und Handeln technischer Agenten muss im Rhythmus des Prozessgeschehens, also rechtzeitig, erfolgen. Dies kann nur erreicht werden, wenn die technischen Agenten bzw. deren Software *Echtzeitverhalten* besitzen.

Der Agentenkopf kann auch mehrere Agenten beherbergen, die dann Software-Charakter besitzen. Diese Agenten unterstützen den Systemagenten, indem sie Teilaufgaben ausführen. Dazu koordiniert der Systemagent die Arbeit der unterlagerten Assistenzagenten im Sinne eines Client-Server-Systems.

Der Entwurf und die Behandlung technischer Agenten bzw. solcher Agentensysteme erfordert die Zusammenführung und Verknüpfung mehrerer unabhängig voneinander bestehender Fachgebiete. Hierzu zählen neben Maschinenbau, Elektrotechnik und Elektronik vor allem die Automatisierungstechnik (in nahezu ihrer gesamten Breite), die Informatik, Kommunikationstechnik sowie die künstliche Intelligenz.

4.2. Mobile technische Agenten

Bei den mobilen technischen Agenten handelt es sich um technische Gebilde, also Körper mit der speziellen Fähigkeit, sich in einer Umgebung selbst bewegen zu können. Dies erlaubt diesen Körpern sowohl ihre *Position* als auch *Orientierung* zu verändern. Dabei kann es an verschiedenen Orten sowohl zu physischen als auch informationellen Interaktionen kommen.

Physikalische Interaktion gibt es bei mobilen Agenten in Bezug auf ihre Umgebung als auch zwischen mobilen Agenten untereinander. Die Agentenumwelt ist weitgehend geometrisch und physikalisch geprägt und bestimmt weitgehend den Bewegungsraum des Agenten. Die Bewegungsmöglichkeiten in diesem Raum unterliegen Beschränkungen in Form von Hindernissen oder auch vorgegebenen Strukturen. Mit dem Reisen verändern (verschieben, verdrehen) sich auch die individuellen Arbeitsräume der Agenten, was insbesondere für mobile Arbeitsroboter von Bedeutung ist. Mit der Mobilität technischer Agenten ist nicht nur die Bewegung des Agentenkörpers sondern auch der Transport von Information, gelegentlich aber auch von Material und Energie verbunden.

Die *informationelle* Interaktion (Kommunikation) zwischen mobilen technischen Agenten und ihrer Umwelt bzw. den Agenten untereinander ist naturgemäß nur auf leitungsfreiem Weg möglich. Eine derartige Mobilkommunikation wird zur funktionsbedingten Übertragung von Daten, Nachrichten, gelegentlich aber auch von Prozeduren benötigt.

Die Bewegung mobiler technischer Agenten wird bestimmt durch die Wahl des Fahrweges innerhalb des Bewegungsraums und Geschwindigkeitsverlaufs des Agenten. Die Agentenfunktionalität mobiler technischer Systeme drückt sich dahingehend aus, dass ihnen nicht von einer äußeren Instanz vorgeschrieben wird (etwa durch ein Muster von Weichenstellungen), wie sie sich bewegen sollen. Vielmehr obliegt diese Bewegung der eigenen Entscheidung und Ausführung.

Damit sich Agenten innerhalb einer realen Umgebung zielgerichtet bewegen und darin flexibel agieren können, bedarf es der *Navigation*. Dieser aus der See- und Luftfahrt übernommene Begriff bezeichnet eine Gesamtheit von Aufgaben, die mit der raum-zeitlichen Selbstorientierung eines mobilen Objekts in seiner Umgebung zusammenhängen. Dazu zählt einerseits die Bestimmung des momentanen *Standortes* (der Position) und der *Orientierung* des eigenen Körpers. Andererseits ist es notwendig, die weitere Bewegung des mobilen Agenten festzulegen. Dies betrifft die *Planung* der zu verfolgenden Route.

Der Umfang der Leistungen, die von einem mobilen Technischen Agenten für seine Navigation zu erbringen ist, hängt wesentlich von der Strukturiertheit seiner Umgebung, d. h. seines Bewegungsraums ab. Hierbei lässt sich grob zwischen unstrukturierter und strukturierter Umgebung unterscheiden. Bei Vorliegen einer *unstrukturierten* Umgebung wird das potenzielle Fahrgebiet nur durch wenige Beschränkungen (Wände, Küstenlinien, Hindernisse etc.) begrenzt. Es besteht daher eine relativ große Freizügigkeit der Fahrwegwahl, die vom Agenten zur Festlegung einer möglichst günstigen Bahn genutzt werden kann. In diesem Fall bestehen die höchsten Anforderungen an die Navigation. Bei einer *strukturierten* Umgebung reduzieren sich die Bewegungsmöglichkeiten wesentlich auf die Benutzung von Bahnabschnitten eines Fahrnetzes. Ein solches Fahrnetz kann physisch auf verschiedene Art realisiert sein, etwa als Schienen-, Strassen-, Kanal-,

Rohrleitungssystem oder auch durch ein System optisch oder elektrisch wahrnehmbarer Markierungen. Die Fahrwegwahl beschränkt sich in diesem Fall auf in den Netzknoten vorzunehmende Entscheidungen bezüglich der Auswahl eines der möglichen weiterführenden Bahnabschnitte. Das Navigationsproblem vereinfacht sich somit wesentlich.

Das Reisen mobiler technischer Agenten in unstrukturierter oder strukturierter Umwelt gestaltet sich besonders effektiv, wenn *Wissen* über den verfügbaren Bewegungsraum vorliegt. Solches Wissen manifestiert sich in Form eines internen Modells (*Weltbildmodells*), das die wesentlichen Aspekte der Umwelt (Objekte und deren Beziehungen) enthält und in einer für den Agenten verständlichen Weise abbildet. Neben Strukturmodellen werden für besondere Anforderungen auch detailliertere Umweltmodelle benötigt. Dazu gehören sog. *Geometriemodelle*, die erwartungsgemäß geometrische Zusammenhänge der Umwelt erfassen. Damit der Agent mit dem Modell arbeiten, d. h. es „verstehen“ kann (manche Autoren sprechen hier vom „Bewusstsein“ des Agenten gegenüber seiner Umwelt), muss die Originaldarstellung der Modelle in die benutzte Agentensprache übersetzt werden. Interne Umweltmodelle werden einerseits benötigt, damit sich Agenten in ihrer Umgebung orientieren können. Solche Modelle werden außerdem für die Planung einer zielführenden Route benötigt.

Die Ausführung des Routenplans ist Teil der *Bewegungssteuerung*. Aufgabe dieser Steuerung ist es, den Agenten nach den Wegvorgaben des Routenplanes automatisch zu seinem individuellen Ziel zu geleiten. Dazu muss der Fahrweg auch hinsichtlich des Auftretens von Gefahrensituationen, insbesondere möglicher Kollisionen, überwacht werden. Zur Abwehr von Kollisionsgefahren müssen die Agenten mit einer Sensorik zur Erfassung von Hindernissen ausgestattet sein sowie über Verfahren zur Analyse von Gefahrensituationen und Strategien zur Vermeidung von *Kollisionen* verfügen.

Ein anderer Teil der Bewegungssteuerung befasst sich mit dem Management der *Bewegung* mobiler technischer Agenten entlang des vorgeschriebenen Fahrweges, d. h. der Gestaltung des Geschwindigkeitsverlaufs. Hier wird unter Beobachtung der Umgebung derart auf den Bewegungsapparat eingewirkt, dass festgelegte oder auch an die jeweilige Situation adaptierte Zustandsgrößen eingehalten werden. Die Bewegungssteuerung realisiert somit eine vom Start- zum Zielknoten führende *Trajektorie*, die durch den zeitlichen Verlauf diverser geometrischer und bewegungsorientierter Zustandsgrößen (Ortskoordinaten, Geschwindigkeits- und Beschleunigungskomponenten) bestimmt ist.

Für die Mobilität technischer Agenten ist ein *Bewegungsapparat* zuständig, der sehr unterschiedlich sein kann und dessen Realisierung meist einigen technischen Aufwand erfordert. Hierbei kann es sich um ein Fahrwerk handeln, bestehend aus einer bestimmten Anzahl von Rädern und einem Antrieb. Die Räder können einzeln beweglich oder auf Schienen geführt sein. In speziellen Fällen sind die Räder durch Ketten gekoppelt (Raupenfahrwerke). Für Sonderaufgaben (bspw. die Bewegung in unwegsamem Gelände oder das Studium künstlicher Insekten) werden auch Schreitwerke benutzt, wobei die Anzahl der Beine ebenfalls variieren kann. Im Extremfall genügt sogar ein einziges Bein, was dann als Sprungwerk bezeichnet wird. Der mobile Agent ist dann nur zum Hüpfen fähig.

Ein weiteres Erfordernis mobiler technischer Agenten betrifft die Bereitstellung von *Energie* für die Bedürfnisse an Bord. Energie wird in ihrer elektrischen Form sowohl zum Betreiben des Bewegungsapparates (Antriebsenergie) als auch zur Speisung der an Bord vorhandenen elektronischen Einrichtungen (als Hilfsenergie) benötigt. Für die Energiebereitstellung gibt es mehrere Varianten. Eine Möglichkeit besteht in der externen Energiezufuhr über ein Schleppkabel, welches ggf. auch als Kommunikationsverbindung genutzt werden kann. Bei größeren Bewegungsräumen müssen andere Technologien zur Energieübertragung eingesetzt werden. Bei Bewegungen in einer strukturierten Umgebung (bspw. in Verkehrsnetzen) kann die Energiezufuhr über Fahrleitungen mit ohmschem Abgriff oder auch durch induktive Übertragung erfolgen. Bei freier Bewegung in unstrukturierter Umgebung hingegen verbleibt nur eine bordeigene Stromversorgung durch einen mitgeführten Energiespeicher (Akkumulator), dessen Ladezustand allerdings von Zeit zu Zeit aufgefrischt werden muss.

Der Betrieb mobiler technischer Agenten erfordert ebenfalls eine beachtliche *informationstechnische* Ausstattung. Dazu gehören eine zumeist umfangreiche Sensorik zur Beobachtung der Umgebung und des eigenen Zustandes, die automatische Bewegungssteuerung, eine Aktuatorik zur Umsetzung der Steuerbefehle, sowie die zur Realisierung der Agentenfunktionalität benötigte Informationsverarbeitungseinrichtung. Hinzu kommt noch der benötigte technische Aufwand für die Mobilkommunikation, betreffend den Sender, Empfänger, Antenne und weitere informationsverarbeitende Einrichtungen.

4.3. Technische Agentensysteme

Technische Agenten können ebenfalls Gemeinschaften bilden, wobei technische Multi-Agenten-Systeme (MAS) entstehen. Darin können mehrere Agenten nebenläufig aktiv sein. Diese Prozesse müssen dann örtlich und zeitlich koordiniert werden. Es bilden sich komplexere Strukturen, die dauerhaft oder auch temporär bestehen können.

Gemeinschaften insbesondere von *stationären* Agenten ermöglichen das Erbringen von Dienstleistungen, wenn dazu die Möglichkeiten eines einzelnen Agenten überfordert sind oder die Aufgaben auf mehrere spezialisierte Agenten verteilt werden. Die Einzelagenten sind dabei um eine *Kooperation* bemüht, verfolgen aber eigene Interessen.

Gemeinschaften speziell von *mobilen* technischen Agenten ringen häufig gegenseitig um die Durchsetzung eigener Zielstellungen, welche denen der anderen Agenten zumeist entgegen gesetzt sind, so dass *Konkurrenzsituationen* vorliegen. Zumeist handelt es sich hier um den Wettbewerb um die gemeinsame Ressource *Fahrweg*, die nichtverbrauchenden Charakter besitzt. Diese wird während der Belegung durch einen Agenten dann für andere Bewerber blockiert. Für die Auflösung solcher Ressourcenkonflikte gibt es verschiedene Strategien. Hier gibt es zum Einen die Möglichkeiten der Priorisierung. Die Ressource wird in diesem Fall an denjenigen Bewerber vergeben, der zeitlich die erste Belegungsanfrage stellt (Prinzip *FIFO first in first out*). Eine andere Art der Konfliktlösung besteht im Führen von Verhandlungen. Die Ressourcenagenten verfügen in diesem Fall über die Fähigkeit zur Auseinandersetzung. Ziel der wechselseitigen Verhandlungen ist das Finden einer Kompromisslösung.

4.4. Anwendungsbeispiele technischer Agenten

4.4.1. Vorbemerkungen

Technischen Agenten wird ein großes Anwendungspotenzial zugeschrieben. Dazu möchten wir im Folgenden versuchen, zumindest einen Eindruck von der vielseitigen Verwendbarkeit dieser Helfer des Menschen zu vermitteln. Die gebotenen Beispiele sollen nach Möglichkeit verschiedenen Kategorien angehören und sowohl Einzelagenten als auch Mehragentensysteme, stationäre und auch mobile Agenten berücksichtigen. Ein Teil der hier betrachteten, teilweise hochautomatisierten Systeme wird in der derzeitigen Form nur agentenspezifische Teilaspekte realisieren, sodass auch agentennahe Anwendungen in die Auswahl einbezogen werden.

Der Einsatz technischer Agenten unterliegt derzeit einer stürmischen Entwicklung. Dementsprechend darf nicht erwartet werden, dass alle der hier vorgestellten Agentenlösungen bereits eine breite Verwendung gefunden haben. Bei der Auswahl der Beispiele wird es sich nur teilweise um realisierte Einsatzfälle handeln. Andere Agentenlösungen befinden sich noch im Stadium von Pilotlösungen. Es werden auch in die Zukunft gerichtete Lösungsangebote präsentiert. Damit soll auf das immanente Agentenpotenzial aufmerksam gemacht und zu entsprechender Nutzung angeregt werden.

Für die Zuweisung des Agenten-Prädikates werden wir das Vorliegen folgender Fähigkeiten als maßgebliche Kriterien heranziehen:

- autonome Bewältigung komplexer und/oder wechselnder Aufgaben

- flexible Reaktion auf a priori unbekannte Anforderungen bzw. Situationen

4.4.2 Industrieroboter ohne und mit Agenteneigenschaften

Industrieroboter stehen mit den technischen Agenten offensichtlich in einer nahen Beziehung [14]. Die Verwandtschaft rührt einerseits daher, dass Roboter wie auch technische Agenten von ihren Benutzern Aufträge erhalten, die sie selbsttätig auszuführen. Hierbei kann es sich um Aufgaben folgender Art handeln:

- *Handhaben* (Erfassen, Transport und Absetzen von Werkstücken oder auch Werkzeugen zwischen definierten Positionen),
- *Bearbeiten* (Schweißen, Entgraten, Fräsen, Lackieren oder anderes von Werkstücken),
- *Sortieren* (Auswahl, Erfassen, Ordnen und Absetzen von Bauteilen in ein Raster von Plätzen),
- *Montage* (Realisierung einer Folge von Arbeitshandlungen zum schrittweisen Zusammenfügen von Bauelementen zu einer größeren Einheit),
- *Transport* (Aufnahme, Transport und Übergabe von Einzelwerkstücken oder Paletten zwischen i. A. wechselnden Positionen eines Transportnetzes)

Die genannten Aufgaben können auch auf mehrere Roboter verteilt sein, die dann gleichartige oder auch untereinander aufgeteilte Arbeiten verrichten. Damit handelt es sich dann um *Mehrrobotersysteme*.

Industrieroboter führen die auf sie delegierten Aufgaben selbsttätig aus, interagieren und kommunizieren mit einer geometrisch und physikalisch geprägten Umgebung sowie ggf. auch untereinander. Damit stellt sich die Frage, ob Industrieroboter aufgrund dieser Merkmale den technischen Agenten zugerechnet werden können. Um dies zu entscheiden, muss die typische Funktionsweise solcher technischer Mittel untersucht werden. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Arbeitsschritte durch einen Plan festgelegt sind, der von außen erstellt wurde. Dieser Plan enthält eine Folge von Anweisungen, die das Anfahren von Positionen entlang vorgegebener Bahnen, das Öffnen und Schließen von Greifern bzw. das Betätigen von Arbeitsmitteln u. a. betreffen. Eine Selbstplanung oder auch Plankorrektur durch den Roboter ist nicht vorgesehen. Damit ist auch die Berücksichtigung a priori unbekannter Einflüsse aus der Umgebung ausgeschlossen. Die interne Umsetzung dieses Bahnplanes in entsprechende Bewegungen der Gelenke verlangt ein Geometriemodell und ist recht rechenintensiv. Somit ist zu konstatieren, dass Industrierobotern der derzeitigen Generation trotz aller beachtlichen Leistungen i. A. nicht das Prädikat technischer Agenten zugeschrieben werden kann.

Es gibt jedoch durchaus Roboterlösungen, die dieser globalen Einschätzung entgegen stehen. Dazu zählen die sog. Entgratungsroboter [14]. Diese sollen dem Menschen die schwere und schmutzige Arbeit des Putzens und Entgratens gegossener bzw. geschmiedeter Formteile abnehmen. Bearbeitungsroboter, die solche Aufgaben übernehmen, müssen darauf eingerichtet sein, dass die Gratausprägung von Werkstück zu Werkstück in weiten Grenzen variieren kann. Dementsprechend müssen sie darauf flexibel reagieren können. Somit stellen sich Herausforderungen, die eine Agentenfunktionalität verlangen.

Die Beschreibung der von Entgratungsrobotern zu erbringenden Leistung beginnt damit, dass diesen zusammen mit der Auftragserteilung ein Geometriemodell des fertig bearbeiteten Werkstücks zugänglich gemacht wird. Zu Beginn seiner autonomen Tätigkeit vermisst der Roboter die jeweilige Gratausprägung. Danach wird ein individueller Plan erstellt, in dem die zur Abtragung des Grates erforderlichen Bahnen bestimmt werden. Je nach Stärke werden dafür ein bis mehrere Arbeitsdurchläufe notwendig sein. Entsprechend dieser Planung sind anschließend die ermittelten Bahnen unter Kontrolle einer Bahnregelung der Reihe nach abzufahren, wobei überschüssiges Material abgetragen wird. Aus Effektivitätsgründen wird dabei die Vorschubgeschwindigkeit anforderungsgerecht variiert, wobei Bereiche, in denen der Grat Lücken aufweist, im Schnellgang

durchlaufen werden. Wurde auf diese Weise die Sollkontur erreicht, so gilt der Auftrag als erledigt. Wie ersichtlich, agiert der Entgratungsroboter flexibel auf unterschiedliche Bedingungen und bestimmt eigenständig seine Handlungsweise. Damit handelt es sich wohl hier um einen echten technischen Agenten.

4.4.3. Dienstleistungsagenten

Der Mensch möchte sich nach Möglichkeit von Arbeiten entlasten, deren Ausführung für ihn lästig, gesundheitsschädlich oder gar gefährlich ist. Solche Aufgaben können Dienstleistungsautomaten übernehmen. Die bisher realisierten technischen Dienstleister werden zumeist als Spezialroboter betrachtet, die über zusätzliche Fähigkeiten verfügen. Eine vollständige Freisetzung des Menschen kann jedoch erst erreicht werden, wenn solche Dienstleister über eine Agentenfunktionalität verfügen.

Zu den zumindest unangenehmen Aufgaben zählt wohl das Reinigen vor allem großer Räume bzw. Gegenstände. Dies begründet das Interesse an der Entwicklung von Reinigungsautomaten. Die hier anstehenden Aufgaben weisen Merkmale auf, die für den Agenteneinsatz typisch sind, so dass sich hier ein weites Anwendungsgebiet eröffnet. Die hier getroffene Auswahl des zu behandelnden Beispiels für Reinigungsroboter mit Agenteneigenschaften erfolgte unter dem Gesichtspunkt, dass diese Funktionalität auf mehrere Komponenten in diesem Falle verteilt ist. Konkret handelt es sich um ein Projekt des Staubsaugerherstellers *Hoover*, welches mit Unterstützung durch je eine englische und deutsche Universität durchgeführt wurde [15]. Das betreffende Reinigungssystem umfasst maximal 4 autonom agierende Reinigungsroboter, so dass hier ein mobiles Multiagentensystem vorliegt. Zusätzlich gibt es einen stationären PC, der einen Teil der Agentenfunktionalität realisiert. Die sich selbst bewegendes Staubsauger verfügen über eine eigene Fahrsteuerung, bordeigene Stromversorgung (Akkumulator), Umweltsensorik (Infrarot) und Mobilfunkausrüstung. Die Komponenten kommunizieren per Mobilkommunikation miteinander, wobei von den Reinigungsrobotern beständig die aktuellen Positionen sowie Beobachtungen der Umgebung an die zentrale Instanz gemeldet und von dieser wiederum Handlungsanweisungen hinsichtlich der Bahnführung an die mobilen Geräte ausgegeben werden. Bei Auftragserteilung durch den Menschen wird dem Zentralcomputer das Modell des jeweils zu reinigenden Raumes bzw. Raumensembles zugänglich gemacht, wobei es sich hier um eine weitgehend strukturierte Umgebung handelt. In einem Plan ist die Abfolge des Reinigungsprozesses festgelegt. Treten während der Abarbeitung des Planes Meldungen über sensorisch erfasste Hindernisse beim Zentralcomputer ein, so muss dieser den Plan zur Vermeidung von Kollisionen operativ korrigieren. Nach erfolgter Gesamtreinigung werden die Reinigungsroboter an eine definierte Position gefahren und dort stillgesetzt. Damit ist der erteilte Auftrag erfüllt. Zur Agentenfunktionalität gehört weiterhin die Vorsorge für einen ausreichenden Ladezustand der Bordbatterie. Geht deren Kapazität zur Neige, dann unterbricht der Reinigungsroboter seine Dienstleistungsaufgabe und sucht die nächstgelegene Steckdose auf. Dort dockt er sich automatisch an und verbleibt solange an diesem Ort, bis der Akkumulator geladen ist. Damit wird so etwas wie *selbstversorgendes Verhalten* erreicht.

In ähnlicher Weise könnten auch Reinigungsroboter für Glasfassaden an Hochhäusern oder auch große Passagierflugzeuge im Sinne von technischen Agenten funktionieren, wobei es sich dann um mobile Einzelagenten handeln würde. Allerdings besteht hier ein großer Unterschied in der Ausführung des Bewegungsapparates. Hierfür kämen wohl mehrbeinige Schreitwerke mit Klettereigenschaften bzw. beim anderen Beispiel möglichst biegesteife Großkinematiken in Betracht. Derartige Bewegungsapparate erfordern nicht nur einen großen konstruktiven sondern auch beträchtlichen steuerungstechnischen Aufwand.

Ein weiteres, nicht nur kommerziell interessantes Gebiet für Dienstleistungsagenten wären auch selbsttätig agierende Rasenmäher.

Wertvolle Dienste für den Menschen, insbesondere Behinderte, könnten auch sog. Persönliche Assistenten leisten, wofür eine weitreichende Agentenfunktionalität benötigt wird. Hierbei handelt es sich um mobile Einzelagenten, die sich im Umfeld einer Wohneinheit bewegen und in der Lage sein

sollten, im Auftrag ihres Dienstherrn eine möglichst breite Palette von Serviceleistungen zu erbringen. Dazu zählen das bedarfsweise Öffnen der Wohnungstür (möglichst nach vorangegangener Identitätsprüfung des Besuchers), Holen und Bringen der Zeitung bzw. der Post aus dem Briefkasten, einer Getränkeflasche aus dem Kühlschrank und vieles andere mehr. Agenten sollten darüber hinaus in der Lage sein, sich den individuellen Bedürfnissen und Gewohnheiten ihrer Bezugsperson anzupassen. Dazu bedarf es zusätzlicher Fähigkeiten mit dem Charakter von Intelligenz und Lernfähigkeit.

Für die Erledigung ihrer vielerlei Dienstaufträge benötigen solche Agenten zunächst ein hinreichend detailliertes Geometriemodell ihres Arbeitsumfeldes. Je nach Art des Dienstleistungsauftrags ist von den persönlichen Assistenten dann ein Plan zu erstellen, der die Dienstleistung festlegt. Dieser Plan muss dann während seiner Abarbeitung wegen festgestellter Veränderungen fortwährend modifiziert werden. Das Erscheinungsbild solcher persönlicher Assistenten müsste sich dann an dem humanoider Roboter orientieren. Ein besonderes Problem stellt auch die Verwendung einer von beiden Seiten verstandenen Sprache dar.

4.4.4. Medizinische Agenten

Unter dem Begriff Medizinische Agenten sollen hier diejenigen Anwendungen von autonomen technischen Mitteln zusammengefasst werden, die im Zusammenhang mit der Diagnostik und Therapie beim Menschen eingesetzt werden bzw. dafür vorgesehen sind. Dieses Anwendungsgebiet befindet sich derzeit noch im Frühstadium seiner Entwicklung.

In Gebrauch befinden sich bereits sog. Operationsroboter. Diese werden zur Ausführung von chirurgischen Eingriffen an schwer zugänglichen Organen benutzt, wo es auf höchste Präzision ankommt (etwa bei der Entfernung eines Hirntumors). Der Einsatz solcher Roboter erfolgt erst nach umfangreichen Vorbereitungen. Dazu gehört zunächst die Vermessung und Modellaufnahme (3D-Modell) des Operationsgebiets. An Hand dieses Modells wird die Operationsstrategie in Form eines Plans erstellt. Die Realisierung dieses Plans wird dann zunächst an einem Dummy erprobt. Erst dann gelangt die vom Roboter autonom durchgeführte OP am Patienten zur Ausführung. Die OP unterliegt dabei der ständigen Kontrolle eines Chirurgen, wobei jederzeit manuelle Eingriffe möglich sind.

Obwohl bei den derzeitigen Operationsrobotern bereits einige Agentenmerkmale verwirklicht sind, können diese in ihrer derzeit vorliegenden Form noch nicht als Agenten eingestuft werden, da die vorgenommenen Handlungen weitgehend einem von außen vorgegebenen Plan folgen und das System auch kaum über eigene Intelligenz verfügt. Dennoch wurde hier eine Entwicklung eingeleitet, an deren Ende durchaus agentenähnliche Systeme entstehen könnten. Diese würden dann in der Lage sein, selbst zu planen und situationsgerecht zu entscheiden und zu handeln.

Grosse Hoffnungen werden in der Medizin auch auf roboter- oder agentenähnliche Kleinstwesen gesetzt, die in Nanotechnik hergestellt sind. Diese sollen zukünftig den menschlichen Körper bereisen und an vorgegebenen oder selbst entdeckten auffälligen Stellen diagnostische, versorgende oder sogar chirurgische Tätigkeiten ausführen können. Bevor diese Visionen Wirklichkeit werden, werden aber wohl noch Jahre vergehen.

4.4.5. Energieversorgungsagenten

Die selbst bei friedlicher Nutzung der Atomtechnologie bestehenden potenziellen Gefahren wurden aller Welt spätestens deutlich, als im März 2011 im Kernkraftwerk *Fukushima* eine Havarie mit verheerenden Folgen für die Menschen und Natur stattfand. Dieser Schock führte zu einem radikalen Umdenken und letztlich zu einer Energiewende zugunsten der Verwendung regenerativer Quellen.

Neben anderen Lösungsvorschlägen zur bevorzugten Nutzung von Energien aus regenerativen Quellen wurde in [16] ein Konzept dargelegt, welches eine weitgehende Energieautarkie geeignet ausgestatteter Versorgungsgebiete auf der Basis natürlicher Energieträger ermöglichen soll. Dieses Lösungsangebot setzt auf eine weitgehende Dezentralisierung der Energieversorgung unter geschickter

Nutzung eines Energiemixes. Die hier bestehende Herausforderung besteht in der häufig fehlenden Übereinstimmung zwischen dem wechselnden und nicht beeinflussbaren Energieangebot der wichtigsten Quellen, der Windkraft und der Solarenergie, und dem aktuellen Verbrauch im Versorgungsgebiet. Als weitere Schwierigkeit kommt die nur sehr begrenzte Möglichkeit der Energiespeicherung in elektrischer Form hinzu. Der Ausweg besteht in der Verwendung eines Energiemixes unter Hinzunahme weiterer gasförmiger Quellen, insbesondere von Bio- und Wasserstoffgas. Damit ergeben sich auch günstigere Möglichkeiten für die Energiespeicherung.

Angesichts der sich aus dieser Vielfalt ergebenden Komplexität stellen sich hohe Anforderungen an das Management, welches eine kontinuierliche Energieversorgung abgegrenzter lokaler Gebiete zu gewährleisten hat. Für den abgestimmten Einsatz der verschiedenen Energieträger sowie des Einsatzes der vorhandenen Speicher zur Befriedigung des jeweils aktuellen Energiebedarfs wurde in [17] ein Steuerungskonzept vorgestellt, das Agentencharakter aufweist. Die vorgeschlagene Steuerung kann nämlich als ein Auftragnehmer von lokalen Dienstgebern verstanden werden, die unter den beständig wechselnden Bedingungen dauerhaft für ein Gleichgewicht von Energieangebot und -nachfrage zu sorgen hat. Bei der beständigen Ausführung dieses Auftrages muss diese Steuerung nicht nur einer wechselnden Umgebung gerecht werden, sondern auch mit mehreren Teilsystemen zielorientiert interagieren.

4.4.6. Verkehrsagenten

Transportaufgaben, in denen technischen Agenten eingesetzt werden können, sind dadurch gekennzeichnet, dass mehrere autonom verkehrende Fahrzeuge eingesetzt werden, die sich ein Transportnetz teilen. Es handelt sich daher um mobile Multiagentensysteme.

Das hierzu angegebene Beispiel betrifft ein neuartiges Verkehrskonzept, welches darauf gerichtet ist, der immer geringer werdenden Verkehrsdurchlässigkeit in Großstädten und Ballungsräumen aufgrund des zunehmenden Individualverkehrs entgegenzuwirken [18]. Die vorgeschlagene Lösung orientiert auf die Verminderung des Automobilverkehrs zugunsten einer verstärkten Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel. Um dies zu erreichen, soll die Beförderung unter weitgehender Berücksichtigung individueller Transportwünsche hinsichtlich Ort und Zeitpunkt der Reise erfolgen. Das Lösungsangebot basiert auf einem Agentenkonzept. Als Transportmittel sind fahrerlose Kabinen mit eng begrenzter Kapazität vorgesehen, die in einem vorhandenen Verkehrsnetz autonom agieren. Diese Kabinen können in den vorhandenen Stationen von Reisewilligen geordert und manuell mit einer individuellen Zielvorgabe versehen werden. Nach genehmigtem Start werden die Kabinen gefahrlos in ein ringförmig strukturiertes Verkehrsnetz eingekoppelt und bewegen sich dort mit konstanter Fahrgeschwindigkeit. Dort treffen sie auf eine u. U. große Anzahl weiterer Kabinen, welche leer oder belegt sein können. Die Verkehrsbelastung kann somit in weiten Grenzen variieren. Die Fahrt von der jeweiligen Start- zur individuell gewählten Zielstation verläuft dabei unterbrechungslos. Vor Erreichen des Zieles werden die Kabinen aus dem ringförmigen Teilnetz wieder selbsttätig ausgekoppelt und der betreffenden Station zugeleitet, wo sie zwecks Ausstiegs wieder stillgesetzt werden. Wegen der gemeinsamen Nutzung der Ressource Verkehrsweg besteht die Gefahr axialer und auch lateraler Kollisionen der Kabinen, deren Vermeidung ebenfalls zum Leistungsumfang der Lösung gehört. Die vorzugsweise dem Personentransport dienenden Kabinen agieren somit als Agenten, die sich mit anderen, ebenfalls im Netz befindlichen Kabinen arrangieren.

Ein ähnliches Transportproblem besteht in Werkhallen, in denen eine verteilte Produktion von Werkteilen und deren Montage stattfindet. Zu den Transportgütern gehören neben diversen Bauteilen auch Werkzeuge, Spänekisten u. a. Der Transport der Güter (bspw. Kurbelwellen) erfolgt vorzugsweise in Einheiten von Paletten, die an der anfordernden Sendestelle übernommen und nach Erreichen des Empfängers dort wieder abgegeben werden. Zwischen verschiedenen Bearbeitungsstationen, Lieferplätzen und Lagern besteht ein großer Bedarf an Transportdienstleistungen, der nach Art und Umfang in weiten Grenzen variieren kann. Dafür gibt es Lösungen in Form von Transportfahrzeugen, die branchenüblich *carrier* genannt werden. Diese verkehren auftragsgemäß entlang eines in der Werkhalle installierten Verkehrsnetzes. Dieses Netz wird üblicherweise durch ein im Boden verlegtes Leitungsnetz gebildet. Während der Fahrt wird die

Position der Fahrzeuge relativ zur Lage der Leitung induktiv abgetastet, wobei die Fahrzeuge dank einer sensorgeführten (Extremwert-) Regelung der Spur folgen können.

Bei den gegenwärtig realisierten Lösungen wird das Management der eingehenden Transportaufträge sowie die Einsatz- und Fahrwegplanung der Fahrzeuge von einer zentralen Instanz in Form eines stationären (Groß-) Rechners übernommen. Das zumeist angewandte Planungsverfahren beruht auf dem Prinzip der *dynamischen Optimierung* (dynamischen Programmierung). Dabei ergibt sich ein Rechenaufwand, der mit der Anzahl der Fahraufträge bzw. Fahrzeuge exponentiell ansteigt. Die Ausführung der Transportaufträge wird hingegen von den Transportfahrzeugen autonom erledigt.

Alternativ zur bisherigen Lösung könnte das Agentenkonzept eingesetzt werden. Dazu müssten den Transportfahrzeugen jeweils individuelle Transportaufträge übertragen werden, die diese dann unter Beobachtung ihrer Umgebung autonom ausführen. Dabei sind – ähnlich bei dem vorstehend erläuterten Personentransportsystem – axiale und laterale Konflikte zu vermeiden.

Des Weiteren soll auf Einsatzmöglichkeit von Transportagenten im Humanbereich verwiesen werden. Dienstleistungsagenten dieser Art werden dort benötigt, um dem vielerorts bestehenden Mangel an Arbeitskräften entgegenzuwirken. Zu den Bedarfsträgern gehören u. a. Krankenhäuser. Die delegierbaren Aufträge können beispielsweise den Transport unterschiedlicher Speisen oder auch benötigter medizinischer Gerätschaften von der Zentralküche bzw. einem Depot zu unterschiedlichen Plätzen (Krankenzimmern, Betten) betreffen. Bei der Transportausführung könnten durchaus auch Aufzüge in Anspruch genommen werden, so dass der Transportweg dann eine 3. Dimension erhält. Die für Transportzwecke eingesetzten Agenten benötigen ein detailliertes Raummodell, anhand dessen sie den Fahrweg planen. Bei der Planarbeit ist zur Umgehung vorher unbekannter Hindernisse (bspw. abgestellter Betten) ein operatives Handeln notwendig, wofür der ursprüngliche Plan modifiziert werden muss.

Speiseagenten könnten auch in anderen Bereichen Anwendung finden. So wäre beispielsweise ein Einsatz in Restaurants als besonderer Werbegag denkbar.

4.4.7. Fahrzeugagenten

Autonome Fahrsysteme finden weltweit großes Interesse. Daher bemühen sich seit Jahren diverse Fahrzeughersteller, Universitätsinstitute und auch Forschungseinrichtungen (einschließlich solcher militärischer Art) um die Entwicklung fahrerloser Kraftfahrzeuge. Waren die vor Jahren einer staunenden Öffentlichkeit vorgestellten selbstfahrenden Automobile zunächst nur in der Lage, einer festgelegten Spur ohne Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer bzw. von Hindernissen zu folgen, so sind über mehrere Zwischenstufen hinweg mittlerweile völlig autonom agierende Fahrzeuge entstanden. Diese haben in weltweit absolvierten Langstreckentests ihre Praxistauglichkeit eindrucksvoll nachgewiesen. Derartige Fahrzeugagenten ermöglichen beispielsweise ein entspanntes (Mit-)Fahren auf langen Autobahnstrecken unter Einhaltung des optimalen Abstandes zwischen den Fahrzeugen sowie ein selbsttätiges kollisionsfreies Ein- und Auskoppeln in den Fahrzeugstrom an den Autobahnzu- bzw. -abfahrten. Fahrzeuge dieser Art können sich auch im dichten und manchmal sogar chaotischen innerstädtischen Straßenverkehr in jeder auftretenden Situation sicher bewegen. Während der Fahrt, bei der Spurwechsel und Überholmanöver selbständig ausgeführt werden, wird auf andere Verkehrsteilnehmer geeignet reagiert, werden fahrlässige Fußgänger geschützt und auch am Straßenrand spielende Kinder vorausschauend berücksichtigt werden.

Der bei der Realisierung von Fahrzeugagenten zu treibende Aufwand ist allerdings beträchtlich, wie am Beispiel des von Wissenschaftlern der FU Berlin entwickelten autonomen Autos, genannt *MIG (Made in Germany)*, verdeutlicht werden soll [20]. Allein die sensorische Ausrüstung umfasst, neben einem GPS-Empfänger, Geschwindigkeits- und mehreren Beschleunigungsmessern, 7 Laserscanner, 7 Radargeräte, 4 Videokameras und eine Wärmebildkamera. Die damit gewonnenen Informationen werden von speziellen Prozessoren verknüpft und liefern ein detailreiches Abbild der lokalen Umgebung sowie der vorliegenden Verkehrssituation. Die erhaltenen Teilergebnisse werden dann

einem Zentralcomputer zugeführt, der auf dieser Grundlage eine Einschätzung vornimmt, Entscheidungen trifft und diese dann in Handlungen umsetzt.

Die Schöpfer solcher Automobilagenten sind bezüglich deren Zukunftsaussichten sehr optimistisch. Hier wird zunächst ein Einsatz in PKWs – zunächst der gehobenen Klasse – erwartet. Weitere Anwendungsmöglichkeiten werden im carsharing-Bereich sowie im Personen- und Gepäcktransport auf Flughäfen gesehen.

Auch unterhalb der Ebene des bisher betrachteten Agenteneinsatzes kann man auf eine Agentennutzung im Kraftfahrzeugbereich treffen. Dazu sind die vielfältigen Assistenzsysteme unter die Lupe zu nehmen, welche in der Aufpreisliste vieler Hersteller stehen. Systeme dieser Art können durchaus Agentenmerkmale aufweisen [19]. Assistenzsysteme haben vorzugsweise die Aufgabe, vor schwerwiegenden Folgen unvorhersehbarer Ereignisse schützen. Dabei kann es sich je nach Einsatzfall um extreme Zustände des Fahrzeuges, Geschehnisse auf der Fahrbahn (Hindernisse, Straßenglätte, Wild u. a.) oder auch um Unaufmerksamkeiten oder Müdigkeit des Fahrers handeln. Zum Aufspüren solcher Ereignisse wird eine spezialisierte und oftmals auch vielseitige Sensorik eingesetzt. Weitere Informationen können per Funk übermittelte Meldungen sein, beispielsweise über im Vorfeld liegende Baustellen, liegengebliebene Autos, Staus, Nebel, Glatteis etc. Die jeweils erhaltenen Informationen werden bedarfsgerecht vernetzt und miteinander in Beziehung gesetzt. Daraus erfolgt eine Abschätzung und Bewertung der vorliegenden Situation, aus der wiederum Entscheidungen bezüglich der Auswahl einer situationsgemäßen Handlung abgeleitet werden. Die Informationsausgaben solcher agentennaher Assistenzsysteme beziehen sich zumeist auf das – häufig gestufte – Warnen des Fahrers. Ein selbsttätiger Prozesseingriff ist meist nicht vorgesehen oder erfolgt nur in extremen Notfällen.

Anhand des Beispiels eines Einparkassistenten soll hier ein Fahrzeugassistent genauer betrachtet werden, welcher über die volle Agentenfunktionalität verfügt. Erhält ein Einparkassistent vom Fahrer einen Auftrag zum Einparken des Fahrzeuges, dann wird zunächst ein Suchprozess gestartet. Diese Suche nach einer Parklücke erfolgt bei langsamer Vorbeifahrt an den am Fahrbahnrand abgestellten Fahrzeugen, wobei der Abstand zwischen jeweils benachbarten Autos vermessen und in Bezug auf die eigenen Abmessungen gesetzt wird. Bei Feststellung einer hinreichend großen Parklücke wird abgebremst und danach das Fahrzeug rückwärtsfahrend unter sensorischer Kontrolle völlig selbständig und sehr präzise in die Lücke eingelenkt. Damit hat der Agent die auf ihn delegierte Aufgabe völlig selbständig erfüllt und damit seinem Auftraggeber bzw. seiner Auftragsgeberin eine für diese manchmal nicht ganz leichte Aufgabe abgenommen.

4.4.8. Seegängige Agenten

Eine im Schwarzwald ansässige Fachhochschule machte vor einiger Zeit auf sich aufmerksam mit der Präsentation einer für diese Einrichtung ungewöhnlichen Agentenlösung. Bei dem betreffenden Projekt handelt es sich um die Entwicklung eines unbemannten Segelbootes, das in der Lage sein soll, eine selbständige Atlantiküberquerung über 30.000 sm von Hamburg nach Kapstadt und später eine Weltumsegelung zu vollbringen [21], [22]. Die Erfüllung solcher Aufträge bedingt das zielgerichtete Navigieren in einer unstrukturierten, außergewöhnlich weiten Umwelt unter völlig wechselhaften und a priori unbekannten Bedingungen. Somit ist es unmöglich, einem einmal festgelegten Routenplan zu folgen.

Die Projektbearbeitung erforderte zunächst den Bau eines Agentenkörpers, der möglichst kensorsicher sein soll. Die Wahl des zu bauenden Bootes fiel auf den Typ des Trimarans. Weitere Arbeiten betrafen die Entwicklung steuerbarer Hydrauliksysteme für das Setzen und Reffen der Segel sowie für die Bootssteuerung. Für die Schiffsführung wurde ein satellitengestütztes Navigationssystem vorgesehen. Die umfangreichen Kommunikationsanforderungen sollten per Satellitenkommunikation abgewickelt werden. Über diese Verbindung wurde der Kontakt mit der Leitstelle hergestellt. Während der Fahrt wurden auf diesem Wege die aktuellen Positions- und lokalen Wetterdaten sowie per Digitalkamera aufgenommene Lifebilder vom Boot bezogen werden. In umgekehrter Richtung wurden vor allem Navigationsdaten übertragen, die unter Hinzuziehung zusätzlicher Wetterinformationen extern

ermittelt wurden. Die für den Betrieb der bordeigenen Informationstechnik benötigte Energie wurde vorzugsweise aus der Windkraft bezogen und ggf. in Akkumulatoren gepuffert. Auf einen autonomen Kollisionsschutz wurde offenbar verzichtet, weshalb Routen auf wenig befahrenen Seegebieten bevorzugt wurden. Auch das Anlaufen fremder Häfen und Festmachen des Bootes wurde angeheuertem Personal übertragen. Somit genügt die bei diesem spektakulären Projekt erzielte Lösung noch nicht allen Anforderungen an die Agentenfunktionalität. Die für Ende 1999 vorgesehene Atlantiküberquerung musste laut mündlicher Angaben aus seerechtlichen Gründen auf halbem Wege leider abgebrochen werden.

In der Zwischenzeit haben sich die Aktivitäten zur Entwicklung unbemannter Segelboote mit agentenähnlichen Eigenschaften auf internationaler Ebene stark ausgeweitet. Dazu wurden an verschiedenen Stellen technische Lösungen für sog. Roboter-Segler entwickelt. Diese messen ihre Leistungsfähigkeit in lokalen Wettbewerben und sogar in auf dem Atlantik ausgetragenen Weltmeisterschaften [23]. Die jeweiligen Regatten werden durch virtuelle Bojen festgelegt. Die teilnehmenden Boote verfügen über Mittel zur Kurssteuerung und Segelbetätigung. Die benötigte Elektroenergie wird von einem Solarpanel in Verbindung mit einem Akkumulator bereitgestellt. Ein Methanoltank und eine Brennstoffzelle sorgen bedarfsweise für den Hilfsantrieb. Zur informationstechnischen Ausrüstung gehören neben dem unvermeidlichen GPS-Empfänger zur Positionsbestimmung und Geschwindigkeitsmessung ein breit gefächertes Spektrum von Sensoren zur Messung weiterer Umweltparameter, wie Windrichtung, -geschwindigkeit, Luft-, Wassertemperatur etc. Die erhaltenen Daten werden von einem Bordcomputer ausgewertet und zur Planung des optimalen Kurses sowie die notwendigen Wende- und Halsemanöver genutzt. Es wird berichtet, dass die fortgeschrittenen Roboter-Segler es durchaus schaffen, in Gegenwindbereichen selbständig im Zickzackkurs dagegen anzukreuzen. Somit dürften solche Boote die Zuweisung des Attributs schwimmender Agenten rechtfertigen.

Ein weiteres Beispiel maritimer Agenten sind Tauchroboter, die, einmal am Meeresboden abgesetzt, autonom den Meeresboden systematisch (vorzugsweise nach Bodenschätzen) absuchen und auf ein äußeres Kommando hin beladen mit Informationen oder auch Bodenproben wieder auftauchen.

4.4.9. Weltraumagenten

Der Weltraum stellt eine für den Menschen lebensfeindliche Umgebung dar. Aus diesem Grund, wie auch wegen der hohen Einsatzkosten, ist man bemüht, den Einsatz von Menschen im Weltall möglichst stark zu reduzieren bzw. ganz zu vermeiden. Damit tut sich ein großes Einsatzgebiet für technische Agenten auf.

Solche Agenten könnten beispielsweise für Inspektionen sowie Außenarbeiten an Raumstationen oder ausgedehnten Strukturen etwa an der internationalen Raumstation *ISS* eingesetzt werden. Eine andere Verwendung wäre die Erkundung von Oberflächen oder die Aufnahme von Bodenproben auf zunächst erdnahen Planeten. Schließlich könnten Agenten auch für die Durchführung ganzer Weltraummissionen eingesetzt werden. Diese Agentenfunktionalität ist allein deshalb schon notwendig, weil eine Steuerung von der Erde aus wegen der mit zunehmender Entfernung immer größer werdenden Signallaufzeiten nicht mehr mit der erforderlichen Präzision möglich ist.

Der erste Einsatzfall für eine unbemannte Weltraummission ist bereits in greifbare Nähe gerückt. Einer Mitteilung zufolge wird die russische Weltraumagentur Roskosmos bereits gegen Ende 2011 die Raumsonde *Phobos-Grunt* zum Planeten Mars schicken [24]. Dort soll sie den Mond Phobos anfliegen, dort weich landen, Bodenproben entnehmen, zum Rückflug starten und das Material zur Erde zurückbringen. Damit besteht ein komplexer Dienstauftrag, der ohne Agentenfunktionalität nicht zu schaffen wäre. Allein die Signallaufzeiten zwischen beiden Planeten betragen 20 Minuten, so dass ein präzises Manövrieren von der Erde aus auszuschließen ist.

4.4.10. Militärtechnische Agenten

Zu den eher bedrückenden Anwendungen des Agentenkonzepts gehört der Einsatz im Militärwesen. Die Motivation der Militärs resultiert aus dem Bestreben, das eigene Risiko zu minimieren und eigene menschliche Verluste weitgehend zu vermeiden. Des Weiteren locken die vergleichsweise geringen Kosten dieser Waffenart. Dementsprechend wird intensiv daran gearbeitet, typische militärische Aufgaben autonom agierenden Fluggeräten, wie unbemannten Flugzeugen und sog. Drohnen, anzuvertrauen. Die Aufträge beziehen sich auf die Erkundung der militärischen Stärke des Gegners und dessen womögliche Bekämpfung im Hinterland.

Die unbemannten Fluggeräte verfügen zur Erfüllung ihrer Aufträge über eine umfangreiche hochleistungsfähige und vernetzte Sensorik, zu deren Komponenten mehrere multispektrale Sensoren inklusive Kameras sowie ein hochleistungsfähiges Radarsystem gehören. Über deren Empfindlichkeit wird berichtet, dass es möglich sein soll, ein Nummernschild noch aus 3,2 km Höhe zu lesen [25]. Andere Mittel der Informationstechnologie sind mehrere hochleistungsfähige Bordcomputer zur Auswertung der Informationsmenge, ein Satellitennavigationssystem sowie eine ausgefeilte abhörsichere Funktechnik. Die Flugkörper verfügen außerdem über detaillierte digitale Karten des jeweiligen Einsatzorts.

Die ursprünglich unbewaffneten Fluggeräte waren zunächst für die Luftaufklärung vorgesehen. Dazu zählten auch die Grenzüberwachung in unzugänglichen Regionen, Einsätze bei der Drogenbekämpfung und nicht zuletzt auch das Aufspüren der Verstecke von Terroristen. Auf diese Weise wurde auch der Aufenthaltsort von Bin Laden erkundet, ehe er später exekutiert wurde. Die dafür einsetzbaren Drohnen werden in verschiedenen Größen und Leistungsklassen angeboten. Die Kleinsten wiegen gerade einmal 250 g und sind für die Ausspähung von Wohnungen und Konferenzräumen vorgesehen.

Innerhalb kurzer Zeit wurden die Drohnen auch zu Trägern von Präzisionswaffen und entwickelten sich dabei zu tödlichen Erfolgswaffen. Damit wurden bereits verschiedene sog. chirurgische Schläge vor allem gegen Terroristen geführt, unter denen allerdings auch Zivilisten litten.

Die bisher verfügbaren unbemannten Flugkörper werden via Funk von weitab sitzendem Bodenpersonal geführt und liefern vor allem bildhafte Informationen. Während ihrer Missionen agieren sie allerdings weitgehend selbständig. Inzwischen wird jedoch bereits an Flugkörpern mit voller Agentenfunktionalität gearbeitet. Diese sollen dann in der Lage sein, sich ihre Ziele selbst auszusuchen und ggf. zu vernichten ohne mit der Leitstation zu interagieren. Welch eine Horrervorstellung!

Bei den Flugzeugen stehen zunächst die unbemannten Kampfflugzeuge im Vordergrund. Später folgen vielleicht einmal unbemannte Frachtflugzeuge und evt. sogar ebensolche zivile Flugzeuge.

4.4.11. Virtuelle technische Agenten

Bei dieser Art handelt es sich nicht um wirkliche technische Agenten, sondern um deren modellhafte Nachbildungen, also letztendlich um spezielle Programme. Die Modellierung umfasst neben den eigentlichen technischen Agenten auch deren zugehörige Umgebung.

Damit der Experimentator mit solchen virtuellen Welten bequem umgehen kann, verfügen die Simulationssysteme zusätzlich über eine komfortable Benutzerschnittstelle. Bevorzugt wird vor allem eine graphische Präsentation der Agenten, die die Bewegungen und Handlungen in Echtzeit veranschaulicht. Weiterhin werden Bedienereingriffe vorgesehen, die eine Beeinflussung der Steuerung, manchmal sogar eine Veränderung der Konstruktion des Agenten, erlauben.

Zweck der Modellierung ist die Durchführung von Simulationsexperimenten mit technischer Agenten. Solche Untersuchungen sind durchaus vorteilhaft, da sie ein beliebiges Experimentieren unter ungestörten Bedingungen erlauben, das Studium des Verhaltens unter extremen, in der Praxis nicht zulässigen Situationen ermöglichen, weil sie dort möglicherweise Schaden anrichten oder überhaupt

verboten sind. Zudem sind solche Untersuchungen meist auch kostengünstiger als der Bau entsprechender Szenarien bzw. die Durchführung von Experimenten in der realen Welt. Die Möglichkeiten simulativer Untersuchungen betreffen praktisch alle technischen Agenten. Interessant ist diese Methode aber auch für das Verhaltensstudium künstlicher Lebewesen, wie sie im Rahmen der Disziplin *Künstliches Leben KL* (bzw. *Artificial Life AL*) vorgenommen werden.

4.5. Gegenüberstellung von Automatisierungssystemen und technischen Agenten

In den vorstehenden Ausführungen wurde wiederholt die Nähe von Automatisierungs- und technischen Agentensystemen deutlich. Dies wirft die Frage nach den Gemeinsamkeiten und Unterschieden beider Technologien auf, der wir uns hier stellen wollen.

Betrachten wir zunächst die Gemeinsamkeiten, so können folgende Merkmale genannt werden:

- Übernahme vor allem formal-geistiger Tätigkeiten von Menschen
- Implementierung durch technische Gebilde
- Ziel-/Auftragsorientierung
- bidirektionaler Informationsaustausch mit der Außenwelt
- Zugehörigkeit zur Kategorie der Informationssysteme
- Anwendungsmöglichkeiten sowohl in stationären als auch mobilen Systemen
- mögliche Funktionsverteilung auf konzentrierte oder auch verteilte (dezentrale) Systeme

Nicht unmittelbar zu beantworten ist die Frage nach den Unterschieden. Dazu müssen wir zunächst die Automatisierungssysteme etwas genauer kennenlernen. Auch hier trifft man auf eine große Vielfalt damit lösbarer Aufgabenstellungen. Dazu wird nachfolgend eine Auflistung der wichtigsten Grundaufgaben von Automatisierungssystemen zusammen mit einer groben Charakterisierung gegeben (s. [19]):

- Auslösen
Selbsttätiges Inangsetzen definierter Einzelaktionen bzw. plangemäßer Aktionsfolgen in Abhängigkeit von Signalen aus der Umgebung oder Eingaben des Menschen.
- Überwachen
Selbsttätige permanente sensorische Kontrolle von Prozessen oder auch Menschen auf Nominalverhalten mit Ausgabe von Warnmeldungen und ggf. auch Prozesseingriffen bei Abweichungen bzw. in Gefahrensituationen.
- Steuern
Selbsttätiges Führen von Prozessabläufen nach definierten Programmen ggf. mit prozessbedingten Verzweigungen bzw. zu koordinierenden Nebenläufigkeiten.
- Regeln
Selbsttätige permanente Prozessbeeinflussung im Sinne einer stabilen Einhaltung oder des Folgens eines vorgegebenen Prozesszustandes unter Zugrundelegung eines Prozessmodells.
- Adaptieren
Selbsttätige Anpassung des Automatenverhaltens, insbesondere von Reglern, an Veränderungen der Umgebung.
- Optimieren
Selbsttätige Einstellung und Aufrechterhaltung des Optimalwertes ausgewählter prozessinterner Zielgrößen bzw. von systeminternen dynamischen Variablen trotz Variation der Umgebung.

Analysiert man das Verhalten solcher Automatisierungssysteme, so lassen sich folgende Hauptmerkmale feststellen:

- Automatisierungssysteme sind zumeist permanent im Einsatz und verrichten prozessbezogene Tätigkeiten.
- Die jeweilige Funktion wird vorab durch einen Entwurf festgelegt und ist somit vollständig bestimmt.
- Die Systeme verhalten sich weitgehend determiniert.
- Umgebungseinflüsse werden nicht oder nur begrenzt berücksichtigt.
- Die funktionelle Intelligenz ist vergleichsweise niedrig.
- Die Automaten können bedarfsweise mit dem Menschen kommunizieren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

Automatisierungseinrichtungen bringen für den Menschen in vielen Bereichen eine wichtige und unverzichtbare Leistung, indem sie beständig Prozesse nach vorgegebenen Zielen führen und dabei nach festgelegten Funktionen *selbsttätig* handeln.

Damit können wir uns den technischen Agenten unter Bezugnahme auf die Darlegungen in Kapiteln 2. und vorstehenden Abschnitten zuwenden. Die hier gegenüber zu stellenden Hauptmerkmale von Agenten betreffen:

- Agenten sind sporadisch im Einsatz und verrichten auftragsbezogene Tätigkeiten.
- Sie verfügen über eine Vielfalt an Handlungsmöglichkeiten, welche situationsgerecht eingesetzt werden.
- Der benötigte Handlungsablauf ist komplex und vorab meist unabsehbar.
- Die funktionelle Intelligenz ist vergleichsweise hoch.
- Es besteht ein umfangreicher Informations- und ggf. auch Kommunikationsbedarf, um komplexe Situationen einigermaßen sicher einschätzen zu können.
- Die jeweils übernommene Aufgabe wird eigenständig ohne Mitwirkung des Menschen gelöst.

Resümierend folgt hieraus:

Agenten erbringen für den Menschen in vielen Bereichen zunehmend bedeutsamere Leistungen, indem sie für ihn bedarfsweise Aufträge wechselnder Art nach bestimmten Vorgaben erfüllen und dabei *selbständig* handeln.

Verbleibt noch der Hinweis auf ein Grenzgebiet zwischen beiden Technologien. Gemeint sind höherwertige Automatisierungsfunktionen mit dem Charakter von Problemlösungsprozessen sowie lernfähige Automaten (s. [19]). Hier bestehen zweifellos höhere funktionelle Anforderungen, die Merkmale der formalen (künstlichen) Intelligenz betreffen. Aufgaben dieser Kategorie können durchaus von leistungsfähigen Automatisierungssystemen unter gewissen Einschränkungen an Funktionalität bewältigt werden, ansonsten gehören sie wohl in das Gebiet der Agenten. Die Grenze ist also nicht scharf zu ziehen.

5. Software-Agenten

5.1. Wesen und Besonderheiten

Agenten können auch immateriellen Charakter besitzen und speziell die Form intelligenter Programme aufweisen. Diese Agentenkategorie wird als *Software-* oder auch *Informationsagenten* bezeichnet.

Software-Agenten werden eingesetzt, um im Auftrag ihrer Benutzer Aufgaben *informationellen Charakters* auszuführen. Dazu gehört – um einen ersten Eindruck zu vermitteln – das eigenständige Suchen bestimmter Informationen in einem verteilten System bzw. Informationsnetzwerk. Die Ergebnisse sind dann dem Auftraggeber in aufbereiteter Form zu präsentieren. Dies verlangt Kenntnisse über den zu bearbeitenden Problembereich – im Beispielfall über die vorhandenen

Informationsquellen, die Semantik der Informationen u. a. m. Wünschenswert ist außerdem, dass sich Software-Agenten im Verlauf ihres Gebrauchs den Gepflogenheiten des Nutzers anpassen.

Eine mögliche Definition des Begriffes *Software-Agent* könnte lauten:

Ein Software-Agent ist eine komplexe Software-Entität, die vom Benutzer delegierte Informations-orientierte Aufgaben autonom löst und die erhaltenen Ergebnisse anwenderfreundlich präsentiert.

Software-Agenten werden erst im Zusammenhang mit einer konkreten Implementierung wirksam. Dies kann in Form eines Einzelagenten geschehen, der auf einem Rechner (PC, WS) lauffähig ist. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung einer verteilten Rechnerarchitektur, deren Komponenten über eine beliebig komplexe Kommunikations-Infrastruktur (LAN, Intranet, Internet) miteinander interagieren. Hierbei handelt es sich dann um ein Agentensystem.

Damit Software-Agenten eine übertragene Aufgabe selbständig, d. h. weitgehend ohne Rückfragen an den Benutzer lösen können, müssen diese ein *autonomes* Verhalten aufweisen. Der Auftraggeber muss dann nicht notwendigerweise an seinem Rechner präsent sein. Für die Aufgabenlösung werden die üblichen Fähigkeiten von Agenten verlangt, wie *Reaktivität*, *Proaktivität*, *Kommunikativität*, ein gewisses Maß an *Intelligenz* und ggf. auch *Lernfähigkeit*. Eine eher optionale Fähigkeit betrifft die *Mobilität*.

Bei den hier betrachteten Software-Agenten treten uns die in **Kap. 2.** allgemein behandelten Begriffe und Attribute von Agenten entsprechend dem besonderen Charakter von Hardware und Software teilweise in spezifischer Erscheinungsform entgegen. So bezieht sich hier der Begriff *Umgebung* eines Agenten auf die jeweilige Systemumgebung bzw. auf andere vorhandene Rechnerprogramme. Bei diesen Rechnerprogrammen kann es sich im Speziellen sogar um die Software anderer Agenten handeln. Demgemäß sind *Interaktionen* zwischen Software-Agenten und ihrer Umgebung bzw. zwischen verschiedenen Software-Agenten rein informationeller Art. Sie vollziehen sich daher – wie auch die *Kommunikation* – durch Informationsaustausch, welche i. A. über ein Rechnernetzwerk erfolgt.

Software-Agenten können auch mobil sein. Diese Fähigkeit bezieht sich darauf, dass solche Agenten zu anderen Rechnern reisen können. Der Transfer erfolgt hierbei über das Kommunikationsnetz.

Andere Attribute, wie *Autonomie*, *Kooperation*, *Kommunikation*, *Intelligenz* und *Lernen*, bleiben in ihrer ursprünglich diskutierten Form erhalten, da sie auf informationellen Lösungen beruhen.

5.2. Agentensicherheit

Betreffen die auf Softwareagenten delegierten Aufgaben geschäftliche, juristische oder sicherheitsrelevante Sachverhalte oder besteht die Gefahr von Kollisionen, dann ist die Sicherheit von besonders hohem Stellenwert. Besonders hohe Anforderungen bestehen bei den sog. *Transaktionsagenten*, die im *E-Commerce* eingesetzt werden. Mobile Software-Agenten unterliegen einer zusätzlichen Gefährdung, weil sie während ihrer Reise durch das Kommunikationsnetzwerk wiederholt zwischen verschiedenen Hosts hin und her wandern. Dies erhöht die Gefahr von Betriebsstörungen oder der Manipulation. Wird für die Kommunikation ein leitungsfreies Kommunikationsmedium (bspw. Funkübertragung) eingesetzt, dann besteht auch die Möglichkeit der unerwünschten Intervention durch Unbefugte. Die Sicherheit von Agenten bzw. Agentensystemen wird auch durch Viren und unseriöse Benutzer, wie Hacker, bedroht. Andere Störungen können während des Betriebs auftreten, denen unterschiedliche Ursachen zugrunde liegen. Fehlfunktionen lassen sich auch auf Fehler beim Entwurf oder der Programmierung von Agenten zurückführen.

Das spezifische Sicherheitsproblem bei Agenten besteht darin, dass die im Auftrag ihrer Benutzer selbsttätig durchgeführten Handlungen für ihren Auftraggeber intransparent sind und auch nur schwer

kontrolliert werden können. Dies ist aber genau der Preis, der für die Benutzung autonom agierender künstlicher Wesen zu zahlen ist.

Eine der wirkungsvollsten Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit ist die strikte Anwendung des Prinzips der *Identifizierung*. Die einfachste Art der Identifizierung basiert auf der eindeutigen Benutzererkennung durch ein Benutzer-Kennwort (*Benutzer-ID*). Dieses wird mit dem gestarteten Prozess übermittelt und vom Empfänger an Hand einer Prozesstauertabelle überprüft. Ein höheres Maß an Sicherheit bietet die verschlüsselte Identitätskontrolle. Der Identcode wird hier nach einem kryptographischen Verschlüsselalgorithmus umcodiert und nach der Übertragung von einer Zertifizierungsautorität umfassend geprüft. Die Entschlüsselung beim Empfänger kann nur mittels eines in seinem Besitz befindlichen sog. *Private Key* erfolgen. Bei positiver Beglaubigungsüberprüfung übermittelt die Zertifizierungsautorität ein *Zertifikat* an den Absender, in dem wiederum eine verschlüsselte Nachricht enthalten ist. Die dabei verwendeten sicheren Protokolle finden auch bei der interaktiven Nachrichtenübertragung der Agenten Verwendung. Schwierig wird die Lösung des Beglaubigungsproblems bei mobilen Agenten. Das wichtigste Prinzip ist hier die *digitale Signatur*. Dazu wird ein *Token* eingesetzt, mit dem sowohl die Autorität des Agenten als auch die Integrität des vertraulichen Inhalts verifiziert werden.

Weitere sicherheitsgerichtete Maßnahmen sind die Verwendung ganzer Beglaubigungshierarchien in Verbindung mit einem speziellen Beglaubigungsserver. Eine andere wirkungsvolle Maßnahme ist die Einrichtung sog. *Firewalls*. Darunter versteht man *Router*, die nur die Datenpakete autorisierter Nutzer weiterleiten. Solche Firewalls werden vorzugsweise zum Schutz der öffentlich zugänglichen Server eingesetzt. Andere Sicherheitsmassnahmen sind die Einführung von *Beschränkungen*. Diese richten sich auf die Kontrolle der Delegation eines Agenten sowie auf den Zugang zu gewissen Ressourcen. Eine wichtige Maßnahme ist auch die Verwendung *sicherheitsorientierter Agentensprachen*.

Gefahren können auch von den Agenten selbst ausgehen, worüber sich die Fachliteratur allerdings bisher ausschweigt. Agenten könnten sich untereinander abhören, miteinander kämpfen und – zumindest theoretisch – sich sogar vernichten. Derzeit sind ihnen da noch die menschlichen Agenten voraus. Es scheint aber nur noch eine Frage der Zeit zu sein, bis man versuchen wird, künstliche Agenten auch für derart missbräuchliche Zwecke einzusetzen. Darauf sollte man sich rechtzeitig vorbereiten.

5.3. Stationäre und mobile Software-Agenten

Die derzeit verfügbaren Software-Agenten sind überwiegend stationärer Natur. Prinzipiell können solche Agenten aber auch Mobilität aufweisen, was zuweilen durchaus Vorteile bietet.

5.3.1. Stationäre Software-Agenten

Stationäre Software-Agenten sind jeweils an einen bestimmten Rechner gebunden. Zur Aufgabenlösung interagieren sie mit anderen rechnerinternen Programmen und Dateien bzw. über ein (privates oder öffentliches) Netzwerk ggf. mit anderen Rechnern. Charakteristisch für die Arbeitsweise solcher Software-Agenten ist, dass bei der Aufgabenlösung über das Netz Suchanfragen an unterschiedliche Datenbanken gerichtet werden, deren Resultate auf gleichem Weg zurück gelangen.

Das herausragende Merkmal der Arbeitsweise stationärer Software-Agenten ist das Verschicken einer Vielzahl von Nachrichten über das Netz, wodurch dieses stark und häufig unnötig belastet wird. Bemerkenswert ist weiterhin die zumeist geringe Intelligenz der Programme.

Grundsätzlich wird ein Client-Server-System vorgesehen, wobei der den stationären Software-Agenten enthaltende Rechner als Client agiert. Der Verkehr zwischen dem Client und Server ist nach dem Prinzip des *Remote Procedure Calls (RPC)* organisiert. Die Inanspruchnahme der Dienste eines Servers erfolgt dadurch, dass die Absicht, eine bestimmte Prozedur aufzurufen, über die Ausgabe eines *Requests* durch den Client erfolgt. Der entfernte Server arbeitet daraufhin die gewünschte

Procedur ab und sendet das Resultat in Form einer Nachricht über ein *Replay* an den Client-Agenten zurück. Dieses Wechselspiel wiederholt sich im Verlauf der Aufgabenlösung mehrfach unter Einschaltung von Servern. Bei den *Replays* werden häufig zu viele Suchergebnisse übermittelt, welche dann der Client-Agent erst bezüglich ihrer Relevanz sichten muss. Der Verkehr zwischen Client und Server wird bestimmt durch die Verwendung proprietärer Protokolle in einer geschlossenen Umgebung.

5.3.2. Mobile Software-Agenten

Mobile Software-Agenten sind Programme, die in der Regel in einer Script-Sprache geschrieben sind. Die ihnen übertragenen Aufgaben werden gelöst, indem sie sich selbst über das Netzwerk zu dem Rechner begeben, der die jeweils interessierende Datenbank enthält [9], [12]. Solche Agenten verfügen demnach über die Fähigkeit des Reisens, was auch *Migration* genannt wird.

Den mobilen Software-Agenten ist eine Client-Server-Architektur unterlegt, die hier jedoch in anderer Weise genutzt wird. Charakteristisch dafür ist, dass der mobile Software-Agent vom Client-Computer über das Informationsnetz mehrfach zu verschiedenen Remote-Servern reist, um dort ausgeführt zu werden.

Die für diese Betriebsart geeignete Metapher ist das Prinzip des *Remote Programming (RP)*. Dabei werden Nachrichten übertragen, die außer der jeweiligen Funktionsprocedur auch die zugehörigen Datenstrukturen enthalten. Vor dem Versand müssen die Proceduranweisungen und Datenstrukturen geeignet verpackt und gesichert werden. Im Gegenzug sind beim Empfang die erhaltenen Nachrichten zu überprüfen, zu entpacken und unter Interaktion mit dem Server-Agenten auszuführen. Danach kehrt der mobile Software-Agent zum Client zurück und berichtet diesem über seine Funde.

Wie ersichtlich, sind beim Betrieb mobiler Software-Agenten nur verhältnismäßig wenige Informationstransfers über das Netzwerk zu verzeichnen. Damit reduzieren sich die Netzwerkbelastung bzw. der bestehende Bandbreitebedarf bei leitungsfreier Kommunikation. Weitere Vorzüge sind die größere Schonung der vorhandenen Ressourcen sowie die potentiell höhere Flexibilität solcher Agenten-Lösungen.

5.4. Anwendungsbeispiele von Software-Agenten

5.4.1. Übersicht

Software-Agenten befinden sich derzeit noch im Frühstadium der Entwicklung. Sie werden derzeit nur vereinzelt eingesetzt, erfreuen sich aber zunehmenden Interesses.

Für die (mit Sicherheit unvollständige) Darlegung bisher bekannt gewordener Einsatzfälle von Software-Agenten können verschiedene Taxonomien herangezogen werden [3], [5]. Eine der möglichen Gliederung bezieht sich auf die *Umgebung*, in der sie eingesetzt sind. Demnach lässt sich unterscheiden zwischen

- *Desktop-Agenten*
Es handelt sich um Anwendungen innerhalb eines Rechners.
- *Internet-Agenten*
Die Anwendungen beziehen sich auf Rechnerverbünde innerhalb des Internets.
- *Intranet-Agenten*
Der Einsatz der Agenten erfolgt innerhalb von privaten Netzen.

Eine stärkere Differenzierung liefert das Merkmal *Anwendung* mit folgender Unterscheidung:

- *System-Agenten*

Desktop-Agenten, die mit dem Betriebssystem oder der Benutzerschnittstelle (*Graphical User Interface GUI*) eines Rechners interagieren und die Bedienoperationen des Nutzers verringern.

- *Benachrichtigungs-Agenten*
Internet-Agenten, die den Benutzer bei Anfrage oder zu festgesetzten Zeitpunkten über besondere aktuelle Ereignisse (eingegangene Emails, wichtige Nachrichten, neue Produktangebote etc.) informieren.
- *Erinnerungs-Agenten*
Agenten, die den Benutzer auf das Herannahen wichtiger Ereignisse (Geburtstage, Sitzungen etc.) hinweisen.
- *Service-Agenten*
Agenten, die dem Nutzer einen spezialisierten Dienst über das Internet zur Verfügung stellen.
- *Informationssuch-Agenten*
Agenten, die den Benutzer bestimmte Dienste für eine gezielte Informationssuche im Internet anbieten.
- *Informationsfilter-Agenten*
Internet-Agenten, die neue Informationen aus vom Benutzer gewünschten Gebieten oder Informationsquellen (bestimmte Zeitungen, Börsenberichten etc.) herausfiltern und diesem in einer bestimmten Form (bspw. einer Elektronischen Zeitung) zur Verfügung stellen.
- *Kooperations-Agenten*
Agentensysteme, die über eine Kommunikation in einem privaten oder öffentlichen Netz durch Kooperation gemeinschaftlich komplexe Probleme bewältigen.
- *Transaktions-Agenten*
Agentensysteme, deren Mitgliedern vom Benutzer bestimmte Vollmachten übertragen wurden, um den Kauf bzw. Verkauf bestimmter Artikel vorzubereiten und die dafür zu Verhandlungen auf sog. Agenten-basierten Marktplätzen berechtigt sind.
- *Datenbank-Agenten*
Intranet-Agenten, die dem Benutzer einen Dienst für die firmeneigene Datenbank zur Verfügung stellen.
- *Ressourcenvermittlungs-Agenten*
Intranet-Agenten, die in einem Client-Server-System die Ressourcenzuweisung (einschließlich der Ressource Zeit) vornehmen.
- *Prozessautomatisierungs-Agenten*
Intranet-Agenten, welche die in einer verteilten Welt implementierten nebenläufigen Steuerungs- und Regelungsprozesse autonom abwickeln.

Mit den folgenden Beispielen soll versucht werden, einen Eindruck von der Spezifität der Software-Agenten zu vermitteln.

5.4.2. System-Agenten

Bei den hier betrachteten System-Agenten handelt es sich zunächst um Software-Agenten, die auf einem einzelnen Rechner laufen. Dementsprechend interagieren und kommunizieren sie mit gewissen dort vorhandenen Prozeduren und Dateien. Im Beispiel wechselwirken die Agenten mit dem vorhandenen Betriebssystem und werden in der vorhandenen Systemumgebung auch ausgeführt.

Ein typischer Vertreter solcher Betriebssystem-Agenten ist das kommerzielle Produkt *Open Sesame* [26], [27]. Hierbei handelt es sich um einen Schnittstellen-Agenten für die grafische Bedienoberfläche von *MacOS*, der sich durch besondere Eigenschaften auszeichnet. Der Agent überwacht sowohl

Zeitereignisse als auch die Muster der vom Bediener getätigten Bedienereignisse (Folgen von Mausklicks auf aktiven Schaltflächen und Tastatureingaben). Beim Eintreten solcher Ereignisse werden bestimmte Handlungsfolgen geplant und nach Bestätigung durch den Benutzer automatisch ausgeführt. Darüber hinaus ist der Agent in der Lage, wiederholte Handlungsabläufe des Bedieners zu erlernen. Er verfügt dazu über einen integrierten Lernmodul und eine Inferenzmaschine. Der Agent sucht bei jedem Einsatz nach Ablaufmustern, die noch nicht erkannt wurden, und legt bei Bedarf neue Mustern an. Die Inferenzmaschine vergleicht die jeweils vorliegenden Muster mit solchen, die bereits automatisiert worden sind und bietet diese bei Übereinstimmung zur Bestätigung an. Wird die Bestätigung vom Benutzer mehrmals verweigert, dann reagiert der Agent zukünftig durch Übergehen der Bestätigung. Er passt sich somit dem Verhalten des Nutzers an.

5.4.3. Informationssuch-Agenten

Beim Umgang mit dem riesigen und weiterhin explosionsartig ansteigenden Informationsangebot beim Surfen im *World Wide Web* erfolgt der Zugang zu den Internet-Servern üblicherweise über das Kommunikationsprotokoll *HTTP (Hypertext Transfer Protocol)*. Bei der Suche nach bestimmten Inhalten folgt der Nutzer nach Aufruf des betreffenden *Web*-Bereichs den *Links*. Darüber werden dann weitere *Web*-Seiten oder auch Dokumente aufgerufen und dem Nutzer präsentiert.

Dieses Vorgehen ist nur in einfachen Fällen erfolgreich und keinesfalls effizient. Daher werden vorzugsweise die Dienste von *Suchmaschinen* in Anspruch genommen, welche im Internet in zunehmender Anzahl verfügbar sind. Hierbei handelt es sich um Server-Programme, die über den *Web-Browser* gerichtete Anfragen auf dem Internet bearbeiten. Dazu beauftragt der jeweilige Benutzer den *Web-Server* durch Übergabe eines (nach Möglichkeit detaillierten) Suchbegriffs. Am Ende erhält er eine Rückmeldung in Form einer Liste der gefundenen Treffer.

Im Anwendungsbereich der Informationssuche und -filterung im Internet bzw. Web haben Software-Agenten als Vermittler zwischen den Informationsanbietern (*Web-Bereiche*, *Newsgroups* etc.) und Konsumenten eine große Zukunftsperspektive [28], [29]. Die Agenten-Funktionalität verbirgt sich hier im sog. *Web-Roboter* (auch *Spider*, *Crawler* oder *Wanderer* genannt), der in jeder Suchmaschine enthalten ist. Dieser kommuniziert mit Hilfe eines speziellen Protokolls (i. A. *HTTP Hypertext Transfer Protocol*) mit dem *Web*. Die Durchmusterung des *Web* erfolgt wiederum auf Basis von *Hyperlinks*, wobei für die Navigation je nach Produkt verschiedene Strategien (u. a. Priorisierung, Verwendung von Ähnlichkeitsmaßen) zur Anwendung gelangen. Die hierbei aufgefundenen Dokumente werden unter Angabe ihrer Adresse und weiterer Charakteristika in einer indizierten Datenbank abgelegt. Der Abfrage-Server selektiert daraus die Dokumente bzw. Informationen, die der Benutzeranfrage am nächsten kommen. Für die Auswahl der Informationen aus der indizierten Datenbank kommen unterschiedliche Strategien (BOOLEsche und vektorbasierte Verfahren) zum Einsatz. Ein typischer Vertreter eines Agenten-basierten *Web-Roboters* ist der sog. *Spider* von *Lycos*. Such-Agenten können ggf. auch mobilen Charakter haben. In diesem Fall reisen die Agenten zu verschiedenen verteilten Servern über das Internet.

Fortgeschrittene Suchagenten nutzen auch die Möglichkeiten einer parallelen Suche in verschiedenen Domänen. Die eingehenden Suchergebnisse werden dann vom Client nachverarbeitet, indem beispielsweise redundante Links gelöscht und übereinstimmende Resultate verstärkt werden. Ein Beispiel für einen kommerziellen Informationssuch-Agenten mit paralleler Suche ist der *Web Compass*.

Den Such-Agenten ähnlich sind die sog. *Informationsfilter-Agenten*. Der Unterschied besteht darin, dass diese nach Informationen aus verschiedenen Quellen suchen und die Ergebnisse nach vorgegebenen Themen (Politik, Sport, Wetter, Finanzen, ein bestimmtes Fachgebiet etc.) ausfiltern. Der Filtermechanismus basiert vielfach auf einer Häufigkeitsanalyse der vorkommenden signifikanten Begriffe, deren Wortstamm extrahiert und analysiert wird. Ein Beispiel für einen solchen Filteralgorithmus ist der *TfIDf*-Algorithmus (*Term Frequency Inverse Document Frequency*). Zumeist berücksichtigt der Filteragent auch persönliche Präferenzen seines Nutzers, indem er sich auf dessen Gewohnheiten einstellt. In solchen Fällen entsteht eine Art personalisierte Zeitung, die sich der Nutzer

auch zu gewünschten Zeitpunkten bestellen kann. Die Adaption wird durch die Einbindung gewisser Lernfunktionen in die Architektur des Agenten ermöglicht. Ein Filteragent mit dem geschilderten Leistungsvermögen ist das Produkt *NewsHound*.

5.4.4. Agenten-basierte Marktplätze

Hier werden im Internet angesiedelte *Transaktions-Agenten* betrachtet, welche im Zusammenhang mit den erhofften Zuwächsen im Bereich des *E-Commerce* eine weiterhin steigende Bedeutung erlangen. An dieser Stelle betrachten wir Lösungen, bei denen mehrere Käufer bzw. Verkäufer eines Produkts auftreten. Es handelt sich somit um Multi-Agenten-Systeme. Hier ist es zweckmäßig, die Agenten, die Transaktionen durchführen sollen, mit der Fähigkeit der Mobilität auszustatten, was zu Mobilien Multi-Agenten-Systemen führt.

Als geeignete Metapher dienen (*elektronische*) *Marktplätze*, welche durch jeweils eigenständige Agenten realisiert werden. Solche virtuellen Plätze bieten zentrale Orte, an denen sich Kauf- bzw. Verkaufsagenten treffen können, um gewisse Geschäftsvorgänge, mit denen sie beauftragt wurden, weitgehend autonom abzuwickeln. Bei der Führung solcher Geschäftsprozesse treten die Agenten zunächst schrittweise miteinander in Kontakt, um ihre Absichten kundzutun. Danach werden Verhandlungen geführt, wozu die Transaktionsagenten mit gewissen *Befugnissen* ausgestattet sind. Bei Transaktionen mit finanzieller und/oder rechtlicher Relevanz der Verhandlungssachen werden die Befugnisse beschränkt. In diesem Fall sind Rückfragen an den Auftraggeber vor Abschluss eines Kaufs oder Verkaufs zugelassen. Während der Verhandlungen werden i. A. Konflikte deutlich, die aus entgegen gerichteten individuellen Zielen resultieren. Zur Konfliktlösung verfügen die Agenten wiederum über bestimmte *Verhandlungsstrategien*, die vom Auftraggeber spezifiziert werden. Dadurch wird ihnen ein gewisser Verhandlungsspielraum zugebilligt, so dass das Ergebnis nicht exakt vorhersehbar ist.

Nachfolgend sollen zwei typische kommerzielle Produkte agentenbasierter Marktplätze knapp vorgestellt werden, die auf unterschiedlichen Konzepten basieren [5], [30].

- *Telescript*

Dieses Produkt der Fa. *General Magic, Inc.*, *Sunnydale/CA* bietet eine Plattform zur Entwicklung mobiler Software-Agentensysteme. Ursprüngliches Entwicklungsziel war die Unterstützung Elektronischer Marktplätze. Mit der Bereitstellung der *Telescript Engine* ist auch die Verwendung einer bestimmten *Sprache* gleicher Bezeichnung verbunden. Die *Engine* stellt die benötigten grundlegenden Funktionalitäten bereit und muss auf jedem zum System gehörenden Rechner vorhanden sein. Schlüsselbegriffe des Konzepts von *Telescript* sind:

- *Plätze (places)*
Das sind Aktivitätszentren einer Verteilten Architektur (Knoten), in denen eine bestimmte Dienstleistung angeboten wird. Solche Plätze werden bspw. an verschiedene Händler sowie an den Marktplatz vergeben. Ein Rechner kann einen oder auch mehrere solche Plätze enthalten.
- *Agenten agents)*
Agenten sind die eigentlichen Funktionsträger. Sie sind zu jedem Zeitpunkt genau einem Platz zugeordnet. Die derart lokalisierte Dienstleistung kann dann durch andere Agenten in Anspruch genommen werden.
- *Reisen (travel)*
Agenten können zu verschiedenen Plätzen umher reisen. Sie benötigen dafür ein Ticket, welches das Reiseziel und bestimmte Reiseparameter enthält. Jeder Agent kann selbst festlegen, wann er die Reise vornimmt und welche Route dafür gewählt wird..
- *Treffen (meetings)*

Treffen bezeichnen die Aufnahme eines Kontakts zwischen mindestens zwei Agenten, die sich dafür auf dem gleichen Platz befinden müssen. Dazu muss der Kontaktsuchende eine Petition übergeben, die sämtliche Details des gewünschten Treffens enthält. Der Kontaktnehmer muss seine Zustimmung erteilen, damit das Treffen zustande kommen kann.

- *Verbindung (connections)*

Damit wird die Kommunikation zwischen zwei oder mehreren Agenten bezeichnet, die sich auf unterschiedlichen Plätzen befinden. Dazu hat jeder Agent/Platz seine Identität durch Übersendung seiner Signatur bzw. eines Zertifikats nachzuweisen. Bei Akzeptanz wird eine Berechtigung (*permit*) erteilt, die auch wieder entzogen werden kann.

- *Kasbah*

Das am *Media Laboratory des M.I.T., Mass.* entwickelte Produkt *Kasbah* basiert auf der Verwendung anwenderfreundlich gestalteter Formulare. Über entsprechende Einträge hat der Anwender die Möglichkeit, Agenten in gewünschter Anzahl zu kreieren und deren Eigenschaften durch Eingabe von Parametern zu spezifizieren. Hierzu zählt auch die Vorgabe einer gewünschten Verhandlungsstrategie in Form einer parametrierbaren (fallenden) Kurve. Weitere Parameter legen die Art der Kommunikation fest. Ein weiteres Attribut von *Kasbah* ist die Bereitstellung eines *Monitorfensters*, über das der Benutzer jederzeit Einsicht in den Zustand des Geschäftsprozesses nehmen kann. Dieser Monitor liefert Informationen beispielsweise über die Findung eines Handelspartners, den aktuellen Stand der Verhandlungen oder auch den Text erhaltener Emails. Nach Abschluss der Verhandlungen wird dem Benutzer das erzielte Ergebnis vorgelegt

6. Zusammenfassung

Künstliche Agenten gehören einer weitgehend neuartigen Kategorie informationsverarbeitender Systeme mit großem Zukunftspotenzial an. Die Besonderheit von Agentenlösungen besteht darin, dass ihnen übertragene Aufgaben vollständig autonom gelöst werden, wobei der Lösungsprozess unter Unbestimmtheiten stattfindet. Für die Lösungsfindung werden umfassende Informationen benötigt, die durch Einsatz umfangreicher Sensorik und bedarfsweise auch per Kommunikation beschafft werden. Ihre Auswertung erfordert komplexe Informationsverarbeitungsprozesse, in denen eine hochgradige Informationsverknüpfung, Situationsermittlung und –bewertung sowie Handlungsentscheidungen von grundlegender Bedeutung sind. Weitere Besonderheiten bestehen darin, dass Agenten einzeln oder in Gruppen tätig sowie stationär angeordnet oder auch mobil sein können.

Die zunächst dargelegten Grundlagen geben einen Einblick in die verschiedenen Wirkungsmechanismen und bieten Anregungen für die Entwicklung eigener Lösungen. Ausführlichere Darlegungen gibt es zu den Hauptformen, den technischen (Hardware-) und Software-Agenten. Bei den technischen Agenten handelt es sich um gebaute und somit materialisierte künstliche Wesen, die sowohl ortsfest als auch in mobiler Form eingesetzt werden. Entsprechend ihrer breit gefächerten Anwendungsmöglichkeiten wurden zahlreiche Beispiele vorgestellt, die sich sowohl auf potenzielle als auch bereits realisierte Einsatzfälle beziehen. Softwareagenten sind hingegen spezielle informationsverarbeitende Einheiten, die sich in Form spezieller Programme ausdrücken. Die Anwendungen beziehen sich hier auf die Unterstützung der Menschen bei der Bewältigung der Informationsflut im Internet sowie bei der Durchführung virtueller Transaktionen.

Die technischen Agenten stehen in offensichtlicher Nähe zu Automatisierungssystemen, so dass diese Beziehung speziell noch zu betrachten war. Dabei zeigten sich einige Gemeinsamkeiten, aber auch diverse Unterschiede. Das Fazit der Untersuchungen lässt sich dahingehend ausdrücken, dass Automatisierungssysteme *selbsttätig* handeln, technische Agenten hingegen *selbständig* agieren. Agenten sind somit einer höherwertigen Qualitätsstufe zuzurechnen.

Resümierend ist festzustellen, dass sich mit dem Agentenkonzept eine neuartige und hochleistungsfähige Informationstechnologie etabliert, der ein großes Zukunftspotenzial zugesprochen wird. Wenn der vorliegende Beitrag dazu diene, die Verbreitung des Agentenkonzepts zu fördern sowie Anregungen zu weiteren Anwendungen zu geben, dann wäre das gesteckte Ziel erreicht.

Literaturverzeichnis:

- [1] Brustoloni, J. C: Autonomous Agents. Characterization and Requirements. Carnegie Mellon Techn. Rep., Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, 1991
- [2] Wayner, P.; Joch, A.: State of the Art: Agents of Change. Byte pp. 94-95, March 1995
- [3] Caglayan, A., K.: Harrison, C. G.: Intelligente Softwareagenten. Carl Hanser Verlag München, Wien, 1998
- [4] Maes, P. (ed.): Designing Autonomous Agents. Robotics and Autonomous Systems, 6, 1990
- [5] Brenner, W.; Zarnekow, R.; Wittig, H.: Intelligente Softwareagenten. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1998
- [6] Rechenberg, P.; Pomberger, G.: Informatik-Handbuch. Carl Hanser Verlag München, Wien, 1997
- [7] Herrtwich, R. G.; Hommel, G.: Kooperation und Konkurrenz. Studienreihe Informatik. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1989
- [8] Weller, W.: Lernende Steuerungen. VEB Verlag Technik Berlin u. R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1985
- [9] Guilfoyle, C., Warner, E.: Intelligent Agents. The New Revolution in Software. Ovcem Ltd., London 1994
- [10] Wooldridge, M. J., Jennings, N. R. (ed): Intelligent Agents. Proc. of the ECAI-Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages. Springer-Verlag Berlin, 1995
- [11] Lüth, T.: Technische Multi-Agenten-Systeme. Carl Hanser Verlag München, Wien, 1998
- [12] White, J. E.: Mobile Agents, In: Bradshaw, J.: Software Agents. MIT Press, Menlo Park/CA, 1996
- [13] Stein, D. et al. :The Conceptual Framework of MAI2L. Europ. Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent-World (MAAMAW), Neuchatel/CH, Aug. 1993, Preprints, pp.1-11
- [14] Weller, W.: Skript zur Lehrveranstaltungsreihe *Robotik*, Humboldt-Univ. zu Berlin, Inst f. Automatisierungstechnik
- [15] Beutler, J.:Entwicklung und Untersuchung von Suchstrategien für autonome mobile Systeme. Diplomarbeit 1995, Humboldt-Universität zu Berlin, Inst. für Automatisierungstechnik
- [16] Weller, W; Will, M.: Create the future. Gesamtheitliches Konzept zur dezentralisierten Energieversorgung auf der Basis regenerativer Quellen. IKZ-ENERGY, Teil I:2/2011, S. 60-63, Teil II: 3/2011, S. 78-81

- [17] Weller, W.: Steuerung des regenerativen Energiemixes in lokalen Teilsystemen. Sept. 2011, (z. Z. unveröffentlicht)
- [18] Weller, W.: Innovatives Nahverkehrssystem zur Eindämmung des Autoverkehrs in Großstädten und Ballungsgebieten. Okt. 2011, (z. Z. unveröffentlicht)
- [19] Weller, W.: Automatisierungstechnik im Überblick. Was ist, was kann Automatisierungstechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2008, ISBN 978-3-410-16760-0
- [20] Granitza, E.: Autonome Autos auf der Überholspur. Berliner Zeitung, Teil Wissenschaft Nr. 109, 11. Mai 2011
- [21] Grotelüschen, F.: Ferngesteuert über die Weltmeere. Berliner Zeitung, Teil Wissenschaft Nr. 258, 05. Nov. 1997
- [22] <http://www.fh-furtwangen.de>
- [23] Shafy, S.: Das Boot als Skipper. Der Spiegel 28/2009, S. 125
- [24] Herold, F.: Russland-Großer Ehrgeiz, wenig Geld. Berliner Zeitung Nr. 258, 04. Nov. 2011, S. 8
- [25] Lorenz, A.; J. v. Mittelstaedt; G. P. Schmitz: Botschafter des Todes. Der Spiegel 42/2011, S. 96-102
- [26] Caglayan, A. et al.: Lessons of Open Sesame!. 1st Int. Conf. on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology. London 1996
- [27] <http://www.opensesame.com/products/sesame/sesame.html>
- [28] Janca, P. C.: Pragmatic Application of Information Agents.: BIS Strategic Div., May, 1995
- [29] Liebermann, H.: Letizia: An Agent that Assists Web Browsing. Int. Joint Conf on AI, Montreal/CAN, 1995
- [30] <http://www.gemagic.com>